



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

ANALISIS STABILITAS TRANSIEN MENGGUNAKAN METODE TRAJEKTORI KRITIS PADA SISTEM MULTI MESIN DENGAN MEMPERTIMBANGKAN AVR DAN GOVERNOR

Muhammad Feisal Hakim
NRP 2211 100 072

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE141599

***TRANSIENT STABILITY ANALYSIS USING CRITICAL
TRAJECTORY METHOD FOR MULTI MACHINE
SYSTEM WITH CONSIDERING AVR AND
GOVERNOR***

Muhammad Feisal Hakim
NRP 2211 100 072

Lecturer
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN MENGGUNAKAN
METODE TRAJEKTORI KRITIS PADA SISTEM MULTI
MESIN DENGAN MEMPERTIMBANGKAN AVR DAN
GOVERNOR**

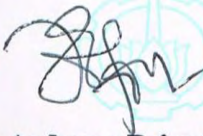
TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I,



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 197309271998031004

Dosen Pembimbing II,



Feby Agung P., ST., M.T.
NIP. 198702062012121002



ANALISIS STABILITAS TRANSIEN MENGUNAKAN METODE TRAJEKTORI KRITIS PADA SISTEM MULTI MESIN DENGAN MEMPERTIMBANGKAN AVR DAN GOVERNOR

Nama : Muhammad Feisal Hakim
Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, ST., M.T.

ABSTRAK

Analisis kestabilan transien mempunyai peranan penting untuk membantu menjaga keamanan operasi sistem tenaga listrik. Ketika sistem mengalami gangguan, rele pengaman akan mendeteksi gangguan dan memerintahkan *circuit breakers* (CB) untuk membuka daerah yang mengalami gangguan. Akan tetapi proses ini tidak menjamin sistem untuk dapat kembali ke keadaan stabil. Hal ini dikarenakan terdapatnya *critical clearing time* (CCT), yaitu waktu kritis setelah terjadi gangguan. Sistem akan kembali ke keadaan stabil apabila CB memutuskan gangguan sebelum CCT. Dan sebaliknya, sistem tidak dapat kembali ke keadaan stabil apabila CB memutuskan gangguan setelah CCT. Perhitungan nilai CCT menggunakan metode konvensional *time domain simulation* (TDS) menyajikan hasil CCT dalam batas *range* stabil dan tidak stabil sistem setelah gangguan. Sedangkan metode yang diusulkan pada tugas akhir ini dapat menyajikan nilai CCT dari sistem multimesin secara langsung menggunakan batasan *controlling unstable equilibrium point* (CUEP). Sistem yang digunakan adalah 3 generator-9 bus Fouad Anderson dan sistem 6 generator-30 bus IEEE saat terhubung *infinite bus* maupun tidak. Pada pemodelan sistemnya ditambahkan kontroler berupa AVR dan governor. Meskipun demikian, waktu komputasi saat perhitungan CCT menggunakan metode *critical trajectory* terbukti tetap lebih cepat daripada metode konvensional TDS.

Kata Kunci : analisis kestabilan transien, *critical clearing time*, *critical trajectory*, *controlling unstable equilibrium point*

Halaman ini sengaja dikosongkan

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS USING CRITICAL TRAJECTORY METHOD FOR MULTI MACHINE SYSTEM WITH CONSIDERING AVR AND GOVERNOR

Name : Muhammad Feisal Hakim
Advisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Advisor II : Feby Agung Pamuji, ST., M.T.

ABSTRACT

Transient stability analysis has an important role to keep the operation in power system safety. When disturbance occur in the system, it will be sensed by the protection relay and ordered the circuit breaker (CB) to open the disturbed area. However, this process does not guarantee the system to be able to return to the stable state. This is due to the presence of critical clearing time (CCT), which is a critical time after an interruption. The system will return to the stable state if the CB disconnect before CCT. And conversely, the system will lead to the unstable state if the CB disconnect after CCT. CCT value calculation using the conventional method time domain simulation (TDS) present the result of CCT within the range of stable and unstable system after disturbance. But the proposed method present the value of the CCT in multi machine system directly using boundary condition controlling unstable equilibrium point (CUEP). System used in this method are 3 machine-9 bus Fouad Anderson and 6 machine-30 bus IEEE when connected to an infinite bus or not. While modelling the system, controller is added in the form AVR and governor. However, the computational time from the CCT calculations using critical trajectory proven remain faster than conventional methods TDS.

Keywords : *transient stability analysis, critical clearing time, critical trajectory, controlling unstable equilibrium point*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puja dan puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia yang tidak terkira berupa kekuatan, kesabaran, dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini tepat pada waktunya. Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menyelesaikan salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Segenap keluarga penulis, Ibunda Dwi Sunaryati, Ayahanda Joedi Prajitno serta adik tercinta Iqbal Ahmad Dhuha yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan do'a yang tiada hentinya untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing 1 penulis yang telah rela meluangkan banyak waktu, memberikan saran, bimbingan, dan bantuan yang tidak ternilai dalam menyelesaikan tugas akhir ini kepada penulis.
3. Bapak Feby Agung Pamuji, ST., MT. selaku dosen pembimbing 2 penulis yang telah membimbing dan mendukung penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Seluruh rekan asisten dan penghuni LIPIST "B-204" yang membantu kelancaran tugas akhir ini mas Defin, mas Chafid, mas Aldimas, mas Ario, mas Royyan, mas Nadir, mas Tumpi, mas Revan, mas Wildan, mas Iskandar, mbak Lala, mbah Isa, Tepe, Wahyu, Gatel, Arip Bhs, Lisa, Maya, Ruli, Esi, Nurul, Evandro, Arip Surip, Viko, Iqbal, Raki, Yudis, mas Wahyu, mas Ony, mas Andikta, mas Dimok, mas Nata, mas Yoga, mas Bejo, mas Vonda, bapak Andi, bapak Alam, ibu Ratna, bapak Anang, bapak Lie, dan bapak ibu S3 lainnya. Terima kasih seluruh bantuan, ilmu, support, canda tawa, dan doanya. Kenangan kalian tidak akan pernah terlupakan.
5. Laila Fatmawati, wanita yang selalu menjadi inspirasi penulis, yang telah memberikan dukungan, waktu, motivasi, serta doa yang tidak terhitung jumlahnya kepada penulis.

6. Seluruh dosen LIPIST “B-204” bapak Heri, bapak Margo, bapak Ardyono, bapak Sidar yang selalu mempermudah birokrasi dan telah sangat ramah kepada penghuni lab termasuk penulis.
7. Rekan rekan gokil K3B yang selalu memberikan semangat dan selalu setia menemani dikala suka dan duka Agung, Entong, Kuntet, Ajiz, Doni, Dahlan, Ucup, Gatel, Wahyu, Tepe, Sodik.
8. Rekan rekan Wilis FC Iqbal, Fiki, Zulmi, Asta, Nores, Jebri, Ryan yang selalu memberikan dukungan dan inspirasi kepada penulis.
9. Seluruh rekan E-51 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama ini. Terima kasih, semoga sukses selalu.
10. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, serta rekan-rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Kadang kita lupa, bahwa untuk melihat diri kita, jalan terbaik adalah melalui mata orang lain. Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xxiii
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Metodologi.....	3
1.5 Relevansi	5
1.6 Sistematika.....	5
 BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Kestabilan Sistem	7
2.2 Klasifikasi Kestabilan	8
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor.....	9
2.2.2 Kestabilan Frekuensi	10
2.2.3 Kestabilan Tegangan	10
2.3 Kestabilan Transien.....	11
2.4 Persamaan Ayunan.....	13
2.5 Newton Raphson <i>Power Flow</i>	18
2.5.1 <i>Well-conditioned case</i>	19
2.5.2 <i>Ill-conditioned case</i>	20
2.5.3 <i>Bifurcation point</i>	20
2.5.4 <i>Unsolvable case</i>	21
2.6 Klasifikasi Bus Sistem	21
2.7 Waktu Pemutus Kritis (<i>Critical Clearing Time</i>)	22
2.8 Lintasan Kritis (<i>Critical Trajectory</i>).....	23
2.9 Kumparan Peredam (<i>Damper Winding</i>).....	24

BAB 3 CRITICAL TRAJECTORY DENGAN CUEP

3.1	Perhitungan Newton Raphson <i>Power Flow</i>	27
3.1.1	Daya Aktif dan Daya Reaktif yang masuk di Bus	27
3.1.2	Perhitungan Error Daya Aktif dan Reaktif	30
3.1.3	Jacobian Matrix pada Newton Raphson <i>Power Flow</i>	31
3.1.4	Rangkuman perhitungan Newton Raphson <i>Power Flow</i>	35
3.1.5	Kegagalan perhitungan Newton Raphson	36
3.2	Reduksi Matriks Jaringan	38
3.3	Pemodelan Sistem	39
3.4	Pemodelan Kontroler	41
3.4.1	Pemodelan AVR	42
3.4.2	Pemodelan <i>Governor</i>	43
3.5	Metode Runge-Kutta orde ke-4 untuk memodelkan kondisi <i>pre-fault</i> dan <i>on-fault</i> sistem	44
3.6	Formulasi Metode	46
3.6.1	Pendefinisian Awal	46
3.6.2	Modifikasi Formulasi Trapezoidal	47
3.6.3	Kondisi Batas (<i>Boundary Conditions</i>)	48
3.6.4	Pemilihan <i>Critical Generator</i>	49
3.6.5	<i>Least Square Minimization</i>	50
3.6.6	Matriks Jacobian	50
3.6.7	Metode Newton Raphson	58
3.6.8	<i>Critical Trajectory</i> dengan metode CUEP	59

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA DATA

4.1	CCT pada Sistem 3-Generator 9-Bus Fouad dan Anderson dengan Mempertimbangkan Kontroler	61
4.1.1	Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT	62
4.1.2	Perhitungan CCT pada Sistem 3 Generator 9 bus Fouad dan Anderson tanpa <i>Damping</i>	64
4.1.3	Analisis Grafik pada Sistem 3 Generator 9 bus Fouad dan Anderson tanpa <i>Damping</i>	66
4.1.4	Perhitungan CCT pada Sistem 3 Generator 9 bus Fouad dan Anderson dengan <i>Damping</i>	85
4.1.5	Analisis Grafik pada Sistem 3 Generator 9 bus Fouad Anderson dengan <i>Damping</i>	86
4.2	CCT pada Sistem 2-Generator 9-Bus Fouad dan Anderson dengan Mempertimbangkan Kontroler terhubung dengan <i>Infinite Bus</i>	105
4.2.1	Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT	107

4.2.2	Perhitungan CCT pada Sistem 2 Generator 9 bus Fouad dan Anderson terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>Damping</i>	108
4.2.3	Analisis Grafik pada Sistem 2 Generator 9 bus Fouad dan Anderson terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>Damping</i>	110
4.2.4	Perhitungan CCT pada Sistem 2 Generator 9 bus Fouad dan Anderson terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>Damping</i>	124
4.2.5	Analisis Grafik pada Sistem 2 Generator 9 bus Fouad Anderson terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>Damping</i>	125
4.3	Perbandingan Perhitungan CCT pada Sistem 3-Generator 9-Bus Fouad dan Anderson dan Modifikasi Sistem 3-Generator 9-Bus Fouad dan Anderson terhubung <i>Infinite Bus</i>	138
4.4	CCT pada Sistem 6-Generator 30-Bus IEEE dengan Mempertimbangkan Kontroler dan <i>Damping Coefficient</i>	141
4.4.1	Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT	143
4.4.2	Perhitungan CCT pada Sistem 6 Generator 30 bus IEEE dengan mempertimbangkan <i>Damping</i>	145
4.4.3	Analisis Grafik pada Sistem 6 Generator 30 bus IEEE dengan mempertimbangkan <i>Damping</i>	147
4.5	CCT pada Sistem 5-Generator 30-Bus IEEE dengan Mempertimbangkan Kontroler dan <i>Damping Coefficient</i> terhubung dengan <i>Infinite Bus</i>	154
4.5.1	Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT	156
4.5.2	Perhitungan CCT pada Sistem 5 Generator 30 bus IEEE terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>Damping</i>	159
4.5.3	Analisis Grafik pada Sistem 5 Generator 30 bus IEEE terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>Damping</i>	160

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	171
5.2	Saran.....	171

DAFTAR PUSTAKA	173
BIODATA PENULIS	177
LAMPIRAN	179

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson.....	63
Tabel 4.2	Spesifikasi data bus sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson	63
Tabel 4.3	Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa <i>power flow</i>	63
Tabel 4.4	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i>	65
Tabel 4.5	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 3 generator dengan mempertimbangkan <i>damping</i>	85
Tabel 4.6	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson.....	107
Tabel 4.7	Spesifikasi data bus sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson	107
Tabel 4.8	Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa <i>power flow</i>	108
Tabel 4.9	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i>	109
Tabel 4.10	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping</i>	124
Tabel 4.11	Perbandingan nilai CCT dengan <i>critical trajectory</i> pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> dan pada sistem 3 generator 9 bus mempertimbangkan <i>damping</i>	138
Tabel 4.12	Perbandingan nilai CCT dengan <i>critical trajectory</i> pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> dan pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> mempertimbangkan <i>damping</i>	139
Tabel 4.13	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 6 generator 30 bus IEEE	143
Tabel 4.14	Spesifikasi data bus sistem 6 generator 30 bus IEEE	144
Tabel 4.15	Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa <i>power flow</i>	145

Tabel 4.16	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan <i>damping</i>	146
Tabel 4.17	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 5 generator 30 bus IEEE terhubung <i>infinite bus</i>	156
Tabel 4.18	Spesifikasi data bus sistem 5 generator 30 bus IEEE terhubung <i>infinite bus</i>	157
Tabel 4.19	Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa <i>power flow</i>	158
Tabel 4.20	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i>	159
Tabel L.1	Data generator sistem Anderson dan Fouad 9 Bus	179
Tabel L.2	Data generator sistem IEEE 30 Bus	179

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Metodologi tugas akhir	4
Gambar 2.1	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga	9
Gambar 2.2	Skema perilaku generator ketika terjadi gangguan.....	12
Gambar 2.3	Klasifikasi bus	21
Gambar 2.4	Lintasan kritis sistem satu generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i>	23
Gambar 2.5	<i>Damper winding</i> setelah dipasangkan pada <i>single salient pole</i>	24
Gambar 2.6	<i>Damper winding</i> pada permukaan kutub rotor mesin sinkron.....	24
Gambar 2.7	Penggambaran sederhana rotor dua kutub menonjol dengan <i>damper winding</i>	25
Gambar 3.1	Sistem 3-generator 9-bus Fouad dan Anderson	35
Gambar 3.2	Proses perhitungan Newton Raphson saat <i>well-conditioned case</i>	36
Gambar 3.3	Proses perhitungan Newton Raphson saat <i>ill-conditioned case</i>	37
Gambar 3.4	Generator sinkron dengan AVR dan <i>governor</i> terhubung <i>infinite bus</i>	39
Gambar 3.5	Penggambaran sistem sebelum terjadi gangguan	40
Gambar 3.6	Penggambaran sistem saat terjadi gangguan di saluran transmisi ke-2	41
Gambar 3.7	Penggambaran sistem setelah gangguan di saluran transmisi ke-2 dihilangkan	41
Gambar 3.8	Blok diagram sistem AVR.....	42
Gambar 3.9	Blok diagram sistem <i>governor</i>	43
Gambar 3.10	Metode Runge-Kutta orde ke-4	45
Gambar 3.11	Konsep modifikasi metode Trapezoidal	48
Gambar 3.12	Konfigurasi dan dimensi dari matriks Jacobian	51
Gambar 3.13	Konfigurasi dari matriks Jacobian secara detail.....	52
Gambar 4.1	Sistem 3-generator 9-bus Fouad dan Anderson	62
Gambar 4.2	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik A	67

Gambar 4.3	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik A 68
Gambar 4.4	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik A 68
Gambar 4.5	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik B 69
Gambar 4.6	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik B 70
Gambar 4.7	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik B 70
Gambar 4.8	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik C 71
Gambar 4.9	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik C 72
Gambar 4.10	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik C 72
Gambar 4.11	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik D 73
Gambar 4.12	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik D 74
Gambar 4.13	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik D 74
Gambar 4.14	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem

	3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik E	75
Gambar 4.15	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik E	76
Gambar 4.16	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik E	76
Gambar 4.17	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik F	77
Gambar 4.18	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik F	78
Gambar 4.19	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik F	78
Gambar 4.20	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik G	79
Gambar 4.21	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik G	80
Gambar 4.22	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik G	80
Gambar 4.23	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik H	81
Gambar 4.24	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik H	82
Gambar 4.25	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik H	82

Gambar 4.26	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik I.....	83
Gambar 4.27	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik I	84
Gambar 4.28	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik I.....	84
Gambar 4.29	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik A.....	87
Gambar 4.30	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik A.....	88
Gambar 4.31	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik A	88
Gambar 4.32	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik B.....	89
Gambar 4.33	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik B.....	90
Gambar 4.34	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik B.....	90
Gambar 4.35	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik C.....	91
Gambar 4.36	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik C	92

Gambar 4.37	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik C92
Gambar 4.38	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik D93
Gambar 4.39	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik D94
Gambar 4.40	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik D94
Gambar 4.41	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik E.....95
Gambar 4.42	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik E96
Gambar 4.43	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik E96
Gambar 4.44	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik F97
Gambar 4.45	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik F98
Gambar 4.46	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik F.....98
Gambar 4.47	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik G99

Gambar 4.48	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik G.....	100
Gambar 4.49	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik G	100
Gambar 4.50	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik H.....	101
Gambar 4.51	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik H.....	102
Gambar 4.52	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik H	102
Gambar 4.53	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik I	103
Gambar 4.54	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik I	104
Gambar 4.55	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik I.....	104
Gambar 4.56	Sistem 2-generator 9-bus Fouad dan Anderson terhubung <i>infinite bus</i>	106
Gambar 4.57	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik B.....	112
Gambar 4.58	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di titik B	113
Gambar 4.59	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di B	113

Gambar 4.60	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik G 114
Gambar 4.61	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di titik G 115
Gambar 4.62	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di G 115
Gambar 4.63	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik H 116
Gambar 4.64	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di titik H 117
Gambar 4.65	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di H 117
Gambar 4.66	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik I..... 118
Gambar 4.67	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di titik I..... 119
Gambar 4.68	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di I..... 119
Gambar 4.69	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik J 120
Gambar 4.70	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di titik J..... 121

Gambar 4.71	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di J.....	121
Gambar 4.72	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> bila mengalami gangguan di titik K.....	122
Gambar 4.73	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di titik K.....	123
Gambar 4.74	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> saat gangguan di K.....	123
Gambar 4.75	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila sistem mengalami gangguan di titik B.....	126
Gambar 4.76	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di B	127
Gambar 4.77	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di B	127
Gambar 4.78	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila sistem mengalami gangguan di titik G	128
Gambar 4.79	Grafik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di G	129
Gambar 4.80	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di G	129
Gambar 4.81	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan	

	mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila sistem mengalami gangguan di titik H.....	130
Gambar 4.82	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di H.....	131
Gambar 4.83	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di H.....	131
Gambar 4.84	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila sistem mengalami gangguan di titik I	132
Gambar 4.85	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di I	133
Gambar 4.86	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di I	133
Gambar 4.87	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila sistem mengalami gangguan di titik J	134
Gambar 4.88	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di J	135
Gambar 4.89	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di J	135
Gambar 4.90	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila sistem mengalami gangguan di titik K	136
Gambar 4.91	Grafik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di K.....	137

Gambar 4.92	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 2 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> saat gangguan di K.....	137
Gambar 4.93	Sistem 6-generator 30-bus IEEE	142
Gambar 4.94	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik A.....	148
Gambar 4.95	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 6 generator 30 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik A	149
Gambar 4.96	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 6 generator 30 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di A.....	149
Gambar 4.97	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik B.....	150
Gambar 4.98	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 6 generator 30 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik B.....	151
Gambar 4.99	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 6 generator 30 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di B.....	151
Gambar 4.100	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik C.....	152
Gambar 4.101	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 6 generator 30 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di titik C.....	153
Gambar 4.102	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap waktu (<i>s</i>) pada sistem 6 generator 30 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan terjadi di C.....	153
Gambar 4.103	Sistem 5-generator 30-bus IEEE terhubung <i>infinite bus</i>	155
Gambar 4.104	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam <i>rad/s</i> terhadap sudut rotor (δ) dalam <i>rad</i> pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan	

	mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik C	161
Gambar 4.105	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> bila gangguan di C	162
Gambar 4.106	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 5 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> bila gangguan di C	162
Gambar 4.107	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik D	163
Gambar 4.108	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> bila gangguan di D	164
Gambar 4.109	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 5 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> bila gangguan di D	164
Gambar 4.110	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik E	165
Gambar 4.111	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> bila gangguan di E	166
Gambar 4.112	Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 5 generator terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> bila gangguan di E	166
Gambar 4.113	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan mempertimbangkan <i>damping coefficient</i> bila mengalami gangguan di titik M	167
Gambar 4.114	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 5 generator 30 bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>damping</i> bila gangguan di M	168

Gambar 4.115 Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di M..... 168

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dasarnya, kestabilan merupakan suatu kemampuan dari sistem untuk melawan gangguan yang terjadi dan berusaha mengembalikan ke keadaan normal. Bila dihubungkan dalam sistem kelistrikan, analisa stabilitas transien mempunyai peranan yang penting untuk memelihara/menjaga keamanan operasi sistem tenaga listrik, yaitu dengan memperhitungkan apakah sistem akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadi gangguan besar, misal adanya motor besar yang starting, perubahan beban yang mendadak, terputusnya unit pembangkit, gangguan pada saluran transmisi, dan sebagainya. Maka dengan analisa kestabilan transien, dapat dianalisa gangguan yang terjadi bersumber di daerah mana, sehingga dapat segera dimaintenance dan kedepannya dapat diantisipasi agar tidak terjadi hal yang serupa.

Selama ini analisa kestabilan pada umumnya dilakukan setelah sebuah plan mengalami kegagalan akibat gangguan yang besar. Akibatnya kerugian dari pihak produsen pun juga tidak dapat dihindari lagi. Dan untuk kedepannya diharapkan terdapat sebuah analisa kestabilan yang dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan atau secara real time, sehingga kerugian dari produsen / pemilik pabrik atau plan dapat diminimalisir sekecil mungkin. Menurut penelitian dari proses-proses tersebut, metode yang populer digunakan adalah menggunakan numerical simulation / *Time Domain Simulation (TDS)*, dimana dalam perhitungan menentukan *Critical Clearing Time (CCT)* nya diperoleh dengan menggunakan metode integrasi numerik secara bertahap dari kondisi awal yang ditentukan. Dari step step yang dilalui tersebut, numerical simulation selalu memakan waktu lama dalam pengoperasiannya, dan hal tersebutlah yang menjadi penyebab metode ini tidak bisa dimanfaatkan untuk analisa kestabilan secara real time. Maka beberapa saat kemudian, beberapa tahun yang lalu, ditemukan metode baru untuk menentukan *CCT* secara langsung yang dinamakan dengan metode trajektori kritis / *Critical Trajectory*. Keunggulan metode baru ini adalah dapat menentukan nilai *CCT* dengan lebih cepat dan akurat, dan di masa depan diharapkan dapat

diterapkan untuk analisa kestabilan transien secara *online / real time*. Tetapi penggunaan metode ini pada pembahasan sebelumnya masih belum sempurna, dimana masih belum mempertimbangkan penggunaan kontroler pada generatornya, yaitu AVR dan governor.

Dalam tugas akhir ini, diusulkan metode baru pada analisa kestabilan transien, yang menggunakan metode *critical trajectory* dengan mempertimbangkan kontroler. Keunggulan dari metode ini adalah dapat menentukan nilai *CCT* dengan cepat dan tepat, serta dapat diaplikasikan pada sistem multi mesin yang mempertimbangkan kontroler berupa *AVR* dan *governor* dalam perhitungannya. Sehingga hal ini bisa dijadikan dasar dari analisa kestabilan transien secara real-time / online. Dalam perhitungannya sendiri, trajektori kritis adalah lintasan / jalur dari titik *CCT* sampai titik end point yaitu *UEP (Unstable Equilibrium Point)*. Setiap mesin memiliki nilai *UEP* sendiri. Karena disini saya tidak hanya menggunakan satu mesin (*single machine*), tapi menggunakan multi mesin (*multi machine*), mengakibatkan nilai *UEP* tidak dapat diperhitungkan, karena akan berbeda pada setiap mesin. Sehingga perlu dilakukan pengontrolan dulu, dan teknik ini disebut *CUEP (Controlling Unstable Equilibrium Point)* dengan menggunakan metode *BCU Shadowing* untuk memperoleh nilainya.

1.2 Perumusan Masalah

Pada tugas akhir ini yang menjadi permasalahan adalah mendapatkan nilai *CCT* dengan metode *CUEP* dan menggunakan persamaan *least square* pada sistem *multi machine* dengan memperhitungkan kontroler yang ada, yaitu *AVR* dan *governor*.

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai *CCT* dengan metode trajektori kritis pada sistem multi mesin dengan melibatkan kontroler yaitu *AVR* dan *governor* dalam perhitungannya. Sehingga, hasilnya mampu memberikan suatu gambaran terhadap kestabilan transient suatu sistem multi mesin beserta seluruh kontrolernya yang sedang aktif.

1.4 Metodologi

1. Studi Literatur

Penulis mencari referensi bahan melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan *browsing* di internet tentang artikel-artikel dan pembahasan yang berhubungan dengan analisa transient serta perkembangan metodenya setiap kurun waktu, dari *TDS* sampai *BCU Shadowing*, pada sistem *multi-machine* yang terhubung dengan *infinite bus*.

2. Perencanaan Program

Menginputkan parameter mesin yang digunakan untuk dimasukkan dalam formulasi perhitungan. Formulasi perhitungan dilakukan untuk menunjang pemodelan sistem dan simulasi yang akan dilakukan. Kemudian dari struktur data formulasi perhitungan tersebut dibuatlah struktur logika berupa diagram alir untuk proses pembuatan program dengan matlab.

3. Simulasi dan Pemodelan

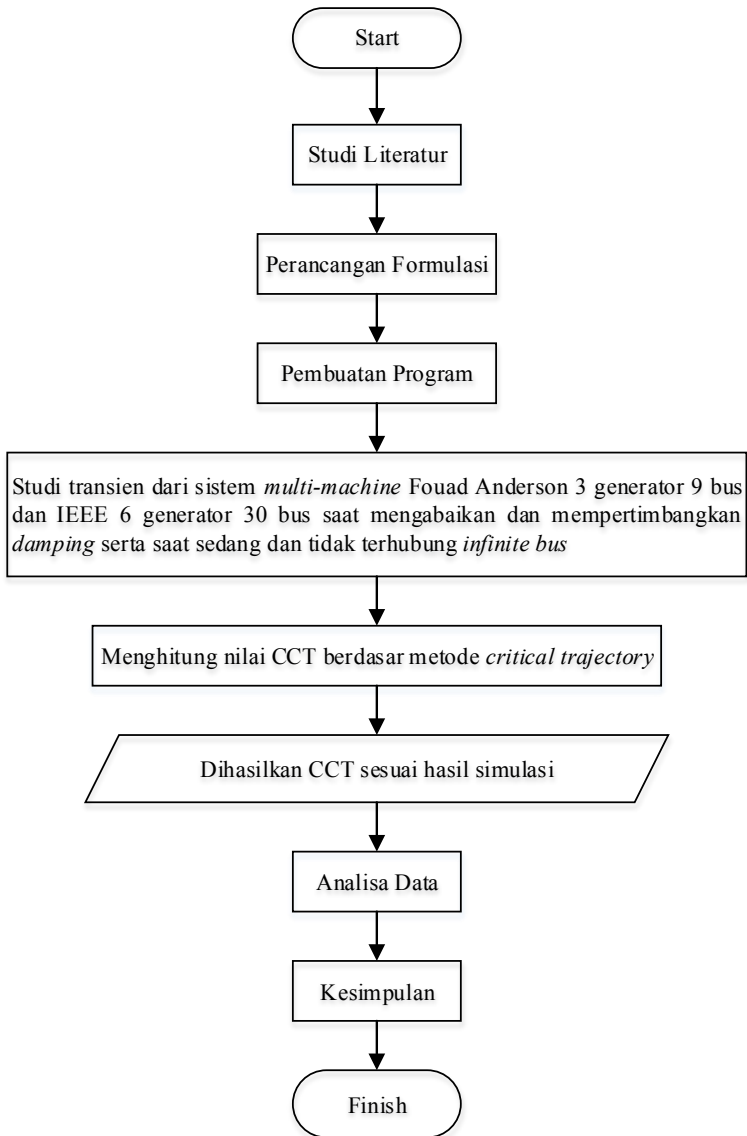
Melakukan studi transien pada sistem *multi-machine* Fouad Anderson 3 generator 9 bus dan pada sistem *multi-machine* IEEE 6 generator 30 bus saat terjadi gangguan, dengan mengasumsikan yang terjadi adalah gangguan terbesar yaitu 3 fasa ke tanah, lalu dibuat pemodelan simulasinya. Kemudian berdasarkan *CUEP* dari sistem *multi-machine* yang terhubung dengan *infinite bus* dihitunglah nilai *CCT*.

4. Analisa data

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan suatu hasil yang akan dianalisis. Data yang akan dibandingkan dan dianalisis adalah parameter-parameter *CCT* pada semua sistem yang digunakan, baik menggunakan *damping* atau tidak, sehingga didapatkan pemodelan yang paling baik.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan merupakan jawaban dari permasalahan yang telah dianalisis. Selain itu, juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.



Gambar 1.1 Metodologi Tugas Akhir

1.5 RELEVANSI

Manfaat dari tugas akhir ini adalah diharapkan dapat menjadi referensi studi analisa kestabilan transien secara *real-time* atau bahkan secara *online* di masa depan, guna memberikan kemudahan menganalisa fenomena transien pada plan PLN atau bahkan sistem *microgrid* yang sedang marak dilakukan studi di masa sekarang.

1.6 SISTEMATIKA

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini membahas mengenai garis besar pengerjaan tugas akhir yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, relevansi atau manfaat tugas akhir, dan sistematika penulisan. Sehingga pada bagian ini, gambaran terkait permasalahan yang diangkat dan solusi yang ditawarkan sudah terpapar dengan jelas, yaitu unuk menentukan nilai CCT pada *plant* yang digunakan.

BAB II Kestabilan Transient Sistem Tenaga Listrik

Pada bab ini membahas mengenai teori kestabilan transient, persamaan ayunan (*swing equation*), analisa aliran daya (*power flow*), pengklasifikasian bus, CCT, lintasan kritis (*critical trajectory*), serta kumparan peredam (*dampner winding*).

BAB III Pemodelan Sistem dan Penerapan Metode

Pada bab ini membahas cara pemodelan sistem untuk perhitungan, serta penjabaran mengenai metode yang akan digunakan saat perhitungan untuk simulasi.

BAB IV Simulasi pada Plan dan Analisa Data

Pada bab keempat ini menyimulasikan metode yang telah dirancang ke plan yang sudah ditentukan sejak awal. Data hasil simulasi tersebut, yaitu parameter CCT pada setiap kondisi gangguan saat kondisi saat mengabaikan atau mempertimbangkan *dampner winding*, serta kondisi saat sedang atau tidak terhubung dengan *infinite bus* akan diamati dan dianalisa untuk mengetahui perbandingannya.

BAB V Penutup

Pada bab terakhir ini akan disimpulkan jawaban dari simulasi dan analisa data yang dilakukan, sehingga akan diketahui pemodelan sistem yang paling baik. Serta akan diberikan saran sebagai masukan tentang hal-hal yang telah dilakukan.

BAB II

KESTABILAN TRANSIEN

2.1 Kestabilan Sistem

Kestabilan sistem tenaga listrik secara luas dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari satu sistem tenaga listrik untuk tetap berada pada kondisi normal setelah sistem mengalami gangguan. Dalam kestabilan sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya output listrik disebut daya elektrik pada sistem dan daya input mekanis disebut daya mekanik pada *prime mover*. Dalam keadaan seimbang, daya mekanik dan daya elektrik bergerak secara bersamaan dengan kecepatan konstan. Ketika terjadi gangguan, maka terjadi perbedaan daya elektrik dan mekanik dari generator. Kelebihan daya elektrik membuat perlambatan putaran rotor generator, hal ini disebabkan semakin terbebannya generator. Namun kelebihan daya mekanik membuat percepatan putaran rotor, hal ini disebabkan semakin ringan beban yang ditanggung generator. Bila gangguan tidak segera dihilangkan, maka perlambatan atau percepatan putaran rotor generator mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam suatu sistem. Maka dari itu diperlukan analisis kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak lepas dari sistem. [4]

Sebuah sistem dikatakan tidak stabil jika tanggapannya terhadap suatu masukan menghasilkan osilasi yang keras atau bergetar pada suatu amplitudo/harga tertentu. Sebaliknya suatu sistem disebut stabil jika sistem tersebut akan tetap dalam keadaan diam atau berhenti kecuali jika dirangsang (dieksitasi oleh suatu fungsi masukan dan akan kembali dalam keadaan diam jika eksitasi tersebut dihilangkan). Ketidakstabilan merupakan suatu keadaan yang tidak menguntungkan bagi suatu sistem lingkaran tertutup sedangkan pada suatu sistem lingkaran terbuka tidak harus stabil. Jelas untuk memperoleh nilai yang memberikan manfaat, praktis sebuah sistem kendali harus stabil. Masukan sistem tidak memberikan pengaruh terhadap kestabilan suatu sistem sehingga jika sistem tersebut stabil terhadap suatu masukan maka sistem akan stabil juga untuk masukan lain. Kestabilan hanya bergantung pada karakteristik sistem itu sendiri. Tanggapan suatu sistem stabil dapat dikenali dari adanya peralihan yang menurun menuju nol terhadap pertambahan waktu. Ini berarti bahwa untuk mendapatkan sebuah sistem yang stabil, koefisien-koefisien dari suku eksponensial yang terdapat dalam tanggapan

peralihan tersebut harus merupakan bilangan-bilangan nyata yang negatif atau bilangan kompleks dimana bagian nyata adalah negatif.

Gangguan yang mempengaruhi kestabilan dalam sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi 2 macam, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil berupa perubahan beban yang berlangsung terus menerus. Gangguan besar seperti lepasnya generator, terjadinya hubung singkat [7].

2.2 Klasifikasi Kestabilan

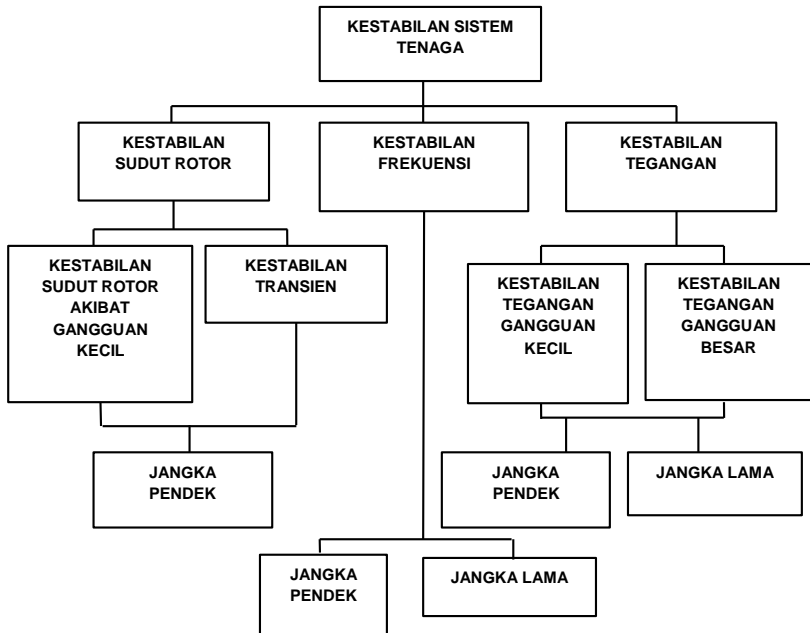
Stabilitas sistem tenaga pada dasarnya adalah sebuah masalah. Namun, berbagai bentuk ketidakstabilan yang mungkin dan dapat terjadi pada sistem tenaga membuat kestabilan sistem tenaga menjadi bervariasi. Klasifikasi stabilitas sistem tenaga listrik dibuat harus berdasar pertimbangan berikut [3] :

1. Sifat alami yang dihasilkan dari mode ketidakstabilan seperti yang ditunjukkan oleh variable sistem utama dimana ketidakstabilan dapat diamati.
2. Ukuran gangguan yang dipertimbangkan, yang mempengaruhi metode perhitungan dan prediksi stabilitas.
3. Perangkat, proses, dan rentang waktu yang harus dipertimbangkan untuk menilai stabilitas.

Setelah memenuhi pertimbangan diatas, kestabilan pada sistem tenaga dapat dikategorikan menjadi tiga, yaitu [1] :

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

Gambar 2.1 memberikan gambaran permasalahan kestabilan sistem tenaga, dan memaparkannya sampai sub-kategori.



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada masing masing mesin. Ketidakstabilan tersebut dapat mengakibatkan berubahnya kecepatan sudut ayunan generator sehingga generator mengalami hilang sinkronisasi dengan generator yang lain. Hal tersebut disebabkan daya output dari generator berubah sesuai dengan berubahnya sudut rotor [3]. Kestabilan sudut rotor sendiri diklasifikasikan menjadi dua yaitu akibat gangguan kecil dan akibat gangguan besar.

Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika sistem mengalami gangguan berat, seperti hubung singkat pada saluran

transmisi [1]. Respon sudut rotor generator mengalami penyimpangan dan dipengaruhi oleh ketidaklinieran hubungan sudut daya. Studi stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan. Untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik. Kestabilan sudut rotor kecil dan kestabilan transien dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek.

Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kesinkronan akibat gangguan kecil [1]. Studi kestabilan ini mempunyai kurun waktu 10-20 detik setelah gangguan dan tergantung pada operasi awal sistem. Ketidakstabilan ini terjadi akibat dua hal antara lain kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya *damping torque*.

2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kestabilan frekuensi ketika terjadi gangguan sistem yang besar akibat ketidakseimbangan antara suplai daya dan beban. Biasanya gangguan ini berupa perubahan pembangkit atau beban yang signifikan [6]. Titik keseimbangan antara suplai daya sistem dan beban harus dipertahankan untuk menjaga sistem dari *generator outage*.

Klasifikasi kestabilan frekuensi diklasifikasikan menjadi 2 yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh kontrol *governor* tidak bekerja ketika terdapat gangguan. Rentang waktu fenomena jangka panjang yaitu puluhan detik hingga beberapa menit. Kestabilan frekuensi jangka pendek adalah terjadinya perubahan beban yang besar sehingga generator tidak mampu untuk memenuhi kebutuhan daya pada sistem.

2.2.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kestabilan tegangan pada semua bus dari sistem tenaga setelah mengalami gangguan. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan kesetimbangan antara *supply* daya pembangkit dan beban. Biasanya gangguan yang terjadi adalah lepasnya beban yang signifikan dan lepasnya generator sehingga tegangan menjadi drop [4]. Kestabilan tegangan dipengaruhi oleh gangguan besar dan gangguan kecil dalam jangka pendek serta jangka lama.

Kestabilan tegangan gangguan besar adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga tegangan *steady* setelah mengalami gangguan besar seperti *generator outage* atau hilangnya pembangkitan dan *short circuit* [4]. Penentuannya dengan pengujian pada sistem tenaga selama periode waktu tertentu untuk mengamati interaksi dan kinerja peralatan *tap changer* trafo, dan pengaman sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan. Kestabilan tegangan gangguan kecil yaitu kemampuan untuk mempertahankan tegangan sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan kecil seperti terjadi perubahan beban kecil. Kestabilan tegangan gangguan kecil digunakan sebagai evaluasi tegangan sistem merespon perubahan kecil beban listrik.

Gangguan kestabilan tegangan jangka pendek mengakibatkan kedip tegangan (*voltage sags*) dan kenaikan tegangan (*swells*). Kedip Tegangan (*voltage Sag*) adalah fenomena penurunan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama periode antara 0,5 cycle hingga 1 menit. Kenaikan Tegangan merupakan fenomena peningkatan *magnitude* tegangan efektif terhadap harga nominalnya dengan durasi antara 0,5 cycle hingga 1 menit. Gangguan kestabilan tegangan jangka panjang mengakibatkan tegangan lebih (*overvoltage*) dan tegangan kurang (*undervoltage*). Tegangan lebih merupakan peningkatan nilai efektif tegangan hingga melebihi 110% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit. Tegangan kurang merupakan penurunan nilai efektif tegangan hingga melebihi 90% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit.

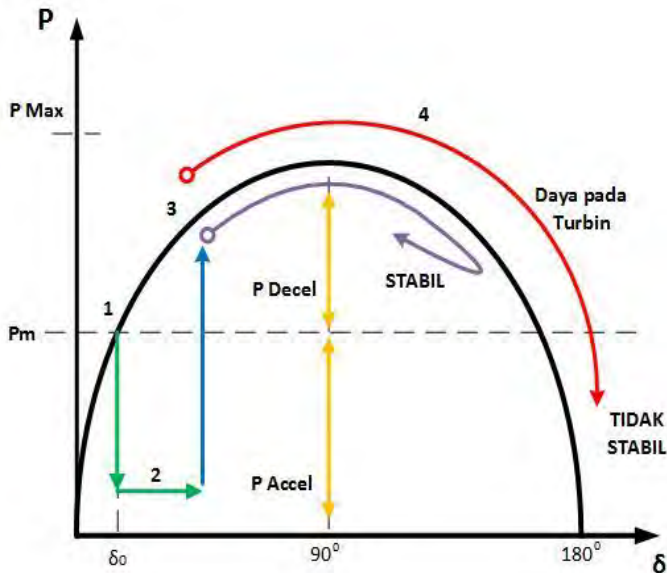
2.3 Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan transien. Respon sistem yang dihasilkan, disebabkan adanya perubahan besar pada sudut daya generator dan dipengaruhi oleh hubungan nonlinier sudut rotor terhadap daya [3]. Masalah yang dibahas pada kestabilan transien ini lebih kompleks daripada kestabilan *steady state*. Analisis kestabilan transien harus dilakukan pada sebuah sistem untuk mengetahui apakah sistem dapat bertahan ketika dan setelah terjadi gangguan transien. Sebuah sistem dikatakan stabil ketika kondisi *steady state*, namun belum tentu stabil ketika terjadi gangguan transien.

Dasar sistematis untuk klasifikasi kestabilan didasarkan atas pertimbangan sebagai berikut [2]:

1. Ukuran dari gangguan
2. Pemodelan yang tepat dan analisis gangguan yang spesifik

3. Rentang waktu saat gangguan berlangsung
4. Parameter sistem yang paling berpengaruh



Gambar 2.2 Skema Perilaku Generator Ketika Terjadi Gangguan [4]

Nomor pada Gambar 2.2 mengilustrasikan keadaan generator ketika terjadi gangguan. Ilustrasi keadaan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

- 1 Keadaan generator sebelum terjadi gangguan
- 2 Keadaan generator ketika terjadi gangguan menyebabkan outputan dari generator berkurang. Akibatnya muncul perbedaan daya output generator dengan daya mekanis turbin. Pada periode tersebut rotor pada generator mengalami percepatan, sedangkan sudut rotor bertambah besar.
- 3 Keadaan ketika gangguan hilang, sehingga daya output generator pulih kembali sesuai dengan kurva P dan δ .
- 4 Keadaan setelah gangguan hilang. Daya output generator menjadi lebih besar dari daya mekanis turbin. Hal ini membuat rotor pada generator mengalami perlambatan. Jika terdapat torsi lawan yang cukup untuk mengimbangi percepatan ketika terjadi

gangguan, maka sistem akan stabil dalam ayunan pertama. Namun jika bila kopel tersebut tidak mampu menahan gangguan, maka sudut rotor/daya akan bertambah besar, sehingga sistem kehilangan sinkronisasi.

2.4 Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Persamaan ayunan sesuai di referensi [5] ditulis ulang dengan modifikasi persamaan dan penyesuaian dengan asumsi dari persamaan yang saya asumsikan. Notasi dot saya gunakan untuk menandai turunan terhadap waktu, seperti berikut :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}, \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.1)$$

Pada rotor mesin sinkron, pengaturan pergerakannya berdasarkan pada prinsip dasar dinamika dimana prinsip ini menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil perkalian dari percepatan sudutnya dan momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor [6]. Persamaan ayunan mengendalikan pergerakan dari rotor generator sesuai dengan persamaan :

$$J\ddot{\theta} = T_a \quad (2.2)$$

Dimana

J : Momen inersia dari seluruh massa dalam $kg.m^2$

$\ddot{\theta}$: Turunan kedua sudut mekanik dari shaft dalam *radian*

T_a : Torsi percepatan dalam $N.m$

Pada mesin sinkron, *prime mover* menggunakan torsi mekanik T_m di *shaft* mesin kemudian mesin akan menghasilkan torsi listrik T_e . Jika karena gangguan, dan nilai torsi mekanik lebih besar daripada torsi listrik, torsi akselerasi akan tercipta dengan percepatan :

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

Dimana

T_m = Torsi mekanik dalam $N.m$

T_e = Torsi listrik dalam $N.m$

Sudut referensi dapat dipilih relatif dari kerangka acuan mesin sinkron dengan kecepatan sudut konstan ω_s :

$$\theta = (\omega_s t + \alpha) + \delta_m \quad (2.4)$$

Dimana

α = konstan

ω_s = nilai kecepatan sudut dalam *radian/second*

t = waktu dalam *second*

δ_m = sudut dari torsi mekanik dalam *radian*

Nilai sudut α diperlukan jika δ_m diperhitungkan dari sumbu yang berbeda dari sudut referensi. Contoh pada beberapa kasus sudut rotor δ_m memberikan nilai $\alpha = \frac{\pi}{2}$ dan $\theta = \omega_s t + \frac{\pi}{2} + \delta_m$. Dari persamaan (2.2), dapat diamati bahwa nilai $\ddot{\theta}$ dapat diganti dengan $\ddot{\delta}_m$ yaitu sebagai berikut

$$J\ddot{\delta}_m = J\omega_m = T_a \quad (2.5)$$

Dimana

ω_m = kecepatan sudut rotor dalam *radian/second*

Bentuk lain dari persamaan (2.5) adalah dengan mengalikan kedua sisi dengan ω_m , maka dapat diperoleh,

$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = J\omega_m\dot{\omega}_m = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.6)$$

Karena perkalian dari torsi T dan kecepatan sudut ω adalah daya P dalam *watt*, maka kita dapat memperoleh,

$$J\omega_m\ddot{\delta}_m = J\omega_m\dot{\omega}_m = P_m - P_e \quad (2.7)$$

Dimana

P_m = daya mekanik yang diinputkan pada generator

P_e = daya listrik yang dihasilkan oleh generator

Kuantitas dari $J\omega_m$ dinamakan *inertia constant* dan dilambangkan dengan M . Hal itu berkaitan dengan energy kinetic dari massa W_k , dengan rumus $W_k = \frac{1}{2}J\omega^2$ joules. Lalu M diperoleh sebagai berikut :

$$\text{Kecepatan sudut} = M = J\omega = \frac{2W_k}{\omega} \quad (2.8)$$

Secara analitis aneh jika M dikatakan *constant* karena nilainya bergantung pada ω , yang selalu berubah ketika kejadian transien. Di sisi lain, frekuensi sudut tidak akan berubah banyak sebelum kestabilan hilang. Persamaan dari pergerakan rotor dinamakan dengan *swing equation*, yang bila memasukkan persamaan (2.8) pada (2.7) adalah :

$$M\ddot{\delta}_m = M\dot{\omega}_m = P_m - P_e \quad (2.9)$$

Untuk menghubungkan kinerja *inertia* mesin terhadap sistem secara keseluruhan, akan lebih praktis untuk mengubah persamaan (2.9) yang memiliki sudut mekanis ke sudut elektrik yang dapat dengan mudah direlasikan terhadap posisi rotor. Seperti sudut δ , yang merupakan sudut antara bidang *Magneto-Motive-Force* (MMF) dan resultan MMF pada celah udara yang keduanya berputar pada kecepatan sinkron. Sudut tersebut juga merupakan sudut elektrik antara *Electro-Motive-Force* (EMF) yang dihasilkan dan resultan tegangan fasor pada stator. Sudut torsi δ , yang mempunyai nilai sama dengan sudut elektrik δ_e , berkaitan dengan sudut mekanis δ_m sesuai persamaan

$$\delta = \delta_e = \left(\frac{p}{2}\right) \delta_m \quad (2.10)$$

$$\delta_m = \left(\frac{p}{2}\right) \delta_e \quad (2.11)$$

Dimana

p = jumlah pole

Untuk menyederhanakan persamaan, nilai e pada δ_e dihilangkan dan hanya ditulis δ , dimana pada setiap persamaan kedepan akan selalu dianggap sebagai nilai sudut elektrik sesuai persamaan (2.11). Kedua persamaan (2.9) dan (2.11) dapat disubstitusi sebagai berikut :

$$\left(\frac{2M}{p}\right) \ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{p}\right) \dot{\omega} = P_a \quad (2.12)$$

Persamaan diatas menghubungkan daya akselerasi P_a terhadap sudut elektrik δ dan kecepatan sudut dari medan magnet putar ω . Dan pada kebanyakan pemodelan dari sistem tenaga, persamaan (2.12) akan banyak dijumpai, yaitu untuk setiap memodelkan generator shaft (dan motor shaft juga bila beban merupakan motor yang besar). Pada sistem yang besar, akan lebih mudah untuk menyederhanakan persamaan dengan membagi setiap sisi dengan VA base 3 fasa S_{B3} . Maka persamaan (2.12) menjadi :

$$\left(\frac{2M}{pS_{B3}}\right) \ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{pS_{B3}}\right) \dot{\omega} = \frac{P_a}{S_{B3}} = P_{au} \quad (2.13)$$

Dengan M , p , δ , dan ω dalam satuan yang sama seperti sebelumnya, hanya saja P_a sekarang dalam satuan p.u menjadi P_{au} . Dan telah menjadi standart untuk memberikan data *inertia* mesin dalam *English units*.

Bentuk dari *swing equation* sendiri harus dalam *MKS units* atau p.u tapi koefisien, terutama momen inersianya, biasanya akan berasal dari *MKS units* dan *English units*. Dimulai dari *swing equation* dalam satuan .m :

$$\left(\frac{2J}{p}\right) \ddot{\delta} = \left(\frac{2J}{p}\right) \dot{\omega} = T_a \quad (2.14)$$

Lalu menormalisasikan persamaan dengan membagi base nya sesuai pada rating torsi dan rating kecepatan,

$$T_B = \frac{S_{B3}}{\omega_{ms}} = \frac{60S_{B3}}{2\pi n_s} \quad (2.15)$$

Dimana,

$S_{B3} = VA$ base 3 fasa sesuai rating

n_s = rating kecepatan motor dalam *rpm*

Lalu dengan membagi persamaan (2.14) dengan (2.15) dan mengganti p dengan $\frac{120f_s}{n_s}$ diperoleh :

$$\left(\frac{J\pi^2 n_s^2}{900\omega_s S_{B3}}\right) \dot{\omega} = \frac{T_a}{T_B} = T_{au} \quad (2.16)$$

Dengan telah mensubstitusi $\omega_s = 2\pi f_s$ untuk frekuensi base. Persamaan (2.16) memiliki satuan *radian/second* dan T_{au} dalam p.u. Dalam hal praktis, J biasanya disebut sebagai $\frac{WR^2}{g}$, dimana g adalah kecepatan gravitasi (32.17398 ft/s^2). Dan bila dikonversi dalam satuan *MKS units* (. s^2 atau $kg.m^2$) maka :

$$J = \frac{(WR^2)slug.ft^2}{g} = \frac{(WR^2)ft.lbf.s^2}{slug.ft^2} = \frac{(WR^2)746W.s}{ft.lbf} \quad (2.17)$$

$$J = \frac{(WR^2)746}{g} \quad (2.18)$$

Lalu mensubstitusi persamaan (2.18) pada (2.16), menjadi :

$$\left(\frac{746(WR^2)\pi^2 n_s^2}{550g(900)\omega_s S_{B3}}\right) \dot{\omega} = T_{au} \quad (2.19)$$

Koefisien $\dot{\omega}$ dapat dijelaskan dengan persamaan energi kinetik rotor W_k dalam *Joule*, yan dapat ditulis sebagai berikut :

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} \times \frac{746(WR^2)}{500g} \times \frac{(2\pi n_s)^2}{3600} \quad (2.20)$$

$$W_k = 2.311525 \times 10^{-4} (WR^2) n_s^2 \quad (2.21)$$

Maka persamaan (2.19) dapat ditulis ulang menjadi :

$$\left(\frac{2W_k}{S_{B3} \omega_s} \right) \dot{\omega} = T_{au} \quad (2.22)$$

Dan sekarang ditemukanlah persamaan yang penting :

$$H = \frac{W_k}{S_{B3}} \quad (2.23)$$

Dimana

$S_{B3} = MVA$ base 3 fasa sistem

$W_k = 2.311525 \times 10^{-4} (WR^2) n_s^2$ Mega Joule

Lalu dapat dituliskan persamaan *swing equation* dalam bentuk sederhana yang banyak digunakan :

$$\left(\frac{2H}{\omega_s} \right) \dot{\omega} = T_a \quad (2.24)$$

Dimana

$H = inertia\ constant$ dalam second

Dengan catatan bahwa ω adalah kecepatan sudut dari medan magnet putar dan hal itu berkaitan langsung dengan tegangan yang dihasilkan dan arusnya. Untuk alasan tersebut ω selalu digolongkan menjadi unit listrik dalam *radian/second*. Dan persamaan akhir dari *swing equation* juga telah diadaptasikan untuk mesin sinkron dengan jumlah pole berapapun, karena kita tahu semua mesin sinkron dalam sistem yang sama akan menyinkronisasikan ke ω_s yang sama pula.

Persamaan lain dari *swing equation*, kadang selalu melakukan beberapa pendekatan/pembulatan, terutama pemodelan mesin sinkron klasik. Bila dianggap ω konstan, dan daya akselerasi dalam *p. u*, maka P_a sama dengan torsi akselerasi T_a , maka modifikasi persamaan *swing equation* tercipta :

$$\left(\frac{2H}{\omega_s} \right) \dot{\omega} \cong P_a \quad (2.25)$$

Kuantitas dari H diberikan untuk mesin yang dijadikan ke satuan p.u dengan membagi rating VA untuk mesin itu sendiri. Dengan dilakukannya pengkorvesian satuan tersebut memudahkan prediksi ukuran mesin dan juga dapat memperlibatkan dalam hitungan mesin-mesin yang secara fisik belum ada. Sesuai dengan persamaan (2.8) bahwa M adalah *inertia constant* dari mesin sinkron dalam s , persamaan *swing equation* dapat ditulis ulang dalam domain M sebagai berikut :

$$\frac{M}{\omega_s} \ddot{\delta} = \frac{M}{\omega_s} \dot{\omega} = P_m - P_e \quad (2.26)$$

Atau bila ditulis ulang dalam domain H menjadi sebagai berikut :

$$\frac{2H}{\omega_s} \ddot{\delta} = M \dot{\omega} = P_m - P_e \quad (2.27)$$

Pada beberapa riset di paper IEEE sering diinginkan untuk melibatkan *damping torque* atau *damping coefficient* yang dilambangkan dengan D , tapi tetap tidak dilibatkan dalam perhitungan mencari nilai T_e . Penambahan koefisien D dapat dilakukan dengan menambahkan persamaan yang sebanding terhadap penyimpangan kecepatan pada persamaan (2.26) sebagai berikut :

$$\frac{M}{\omega_s} \ddot{\delta} = \frac{M}{\omega_s} \dot{\omega} = P_m - P_e - \frac{D}{\omega_s} \omega \quad (2.28)$$

Dan bila ditambahkan pada persamaan (2.27) maka menjadi :

$$\frac{2H}{\omega_s} \ddot{\delta} = M \dot{\omega} = P_m - P_e - \frac{D}{\omega_s} \omega \quad (2.29)$$

Persamaan diatas merupakan persamaan ayunan atau persamaan *swing equation* pada mesin sinkron yang digunakan untuk merepresentasikan pemodelan dari setiap mesin sinkron yang digunakan.

2.5 Newton Raphson Power Flow

Pada umumnya metode yang digunakan saat analisa aliran daya dinamakan *load flow analysis*. Tapi karena sebenarnya yang mengalir melalui saluran transmisi adalah daya dan bukan beban, maka pada buku ini dinamakan *power flow analysis*. Analisa aliran daya berperan penting dalam menjaga monitoring dan operasi sistem. Dengan analisa ini kita bisa mengetahui gelombang *sinusoidal steady state* dari sistem secara

keseluruhan, baik itu dari tegangan, daya aktif dan daya reaktif yang masuk dan keluar bus, dan sebagainya. Dengan analisa aliran daya, bisa didapatkan nilai magnitudo tegangan dan sudutnya di setiap bus pada saat keadaan *steady state*. Sehingga akan dengan mudah mengatur magnitudo tegangan dari setiap bus. Karena pada langkah selanjutnya dari metode ini, beberapa bus yang dikehendaki akan diset magnitudo tegangannya menjadi konstan atau ditahan di level tegangan tertentu. Setelah nilai magnitudo tegangan dan sudut dari setiap bus didapatkan dengan *power flow analysis*, daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran juga akan didapatkan juga. Dan berdasarkan perbedaan daya yang terkirim dan diterima di ujung-ujung saluran transmisi, *losses* atau rugi-rugi pada setiap saluran juga bisa didapatkan. Untuk analisa lebih mendalam lagi, dengan dasar *power flow*, pengklasifikasian beban mengalami kondisi *over load* dan *under load* juga bisa didapatkan dengan mudah.

Dengan sedikit penjelasan diatas, dapat disimpulkan bahwa sebenarnya *power flow analysis* tidak cocok untuk digunakan pada analisa kestabilan transien dan analisa kestabilan dinamis. Tapi, hasil perhitungan *power flow* bisa dimanfaatkan untuk dijadikan kondisi awal sistem pada kedua analisa kestabilan tersebut. Misalkan keadaan awal sudut rotor δ , dan daya mekanis P_m dapat diperhitungkan dengan memperhatikan perubahan tegangan dari bus yang didapatkan dari *power flow*.

Keadaan *steady state* daya aktif dan reaktif yang diberikan pada bus dalam sebuah sistem tenaga direpresentasikan dengan persamaan aljabar nonlinear sebagai persamaan simultan. Maka, diperlukan iterasi yang berkelanjutan untuk menyelesaikan persamaan-persamaan tersebut. Metode *single swing bus* atau *slack bus* diasumsikan untuk digunakan pada *power flow analysis* disini, karena menurut beberapa literatur [17]-[19] hal itu dapat memberikan hasil sedikit lebih baik dari beberapa metode lainnya. Meskipun pada kenyataannya *power flow analysis* menggunakan seluruh generator sebagai *swing* atau *slack*. Berikut beberapa klasifikasi dari permasalahan *power flow* [19]:

2.5.1 *Well-conditioned case*

Hasil perhitungan *power flow* mencapai titik konvergen dan analisa dari sistem dapat diselesaikan dengan mudah menggunakan inisiasi nilai awal standart (misalkan semua magnitudo tegangan beban

bernilai 1 dan sudut tegangan semua bus bernilai 0) dan metode Newton Raphson standart.

2.5.2 *Ill-conditioned case*

Hasil perhitungan dari *power flow* dapat ditemukan, tapi analisa pada keadaan ini tidak dapat diselesaikan menggunakan inisiasi nilai awal standart. Hal ini terjadi karena daerah penarikan hasil perhitungan dari *power flow* terlalu jauh dari inisiasi nilai awal. Pada kondisi ini, *power flow* mengalami kesalah perhitungan karena kurang sempurnanya persamaan yang digunakan pada TDS, dan bukan karena persamaan dari *power flow*. Oleh karena itu ditambahkan modifikasi persamaan Newton Raphson *power flow* untuk mengatasi kondisi seperti ini, yang dibahas pada bab selanjutnya.

2.5.3 *Bifurcation point*

Pada kondisi ini perhitungan dari *power flow* dapat ditemukan seperti dua kondisi sebelumnya, tapi kondisi ini mempertimbangkan *saddle-node bifurcation* atau *limit-induced bifurcation* [12]. Kondisi ini mempertimbangkan batas kestabilan tegangan dan dapat dijelaskan seperti berikut:

a. *Saddle-node bifurcations* berhubungan dengan pembebanan maksimal dari sistem. Titik konvergen tidak dapat dicapai menggunakan *power flow* standart ataupun menggunakan modifikasi persamaan Newton Raphson *power flow*, karena matriks Jacobian dari *power flow* bersifat *singular* pada titik konvergen. Dengan kata lain matriks Jacobian tidak mempunyai determinan pada hasil yang ingin dicapai.

b. *Limited-induced bifurcations* berhubungan dengan *rating* maksimal seluruh peralatan dari sistem, seperti batas maksimal daya reaktif yang bisa dihasilkan. Keterbatasan daya reaktif tersebut terjadi karena sistem eksitasi yang menghasilkan tegangan juga memiliki batas, yaitu *rating* dirinya sendiri. Meskipun *limited-induced bifurcation* pada beberapa kasus dapat mengakibatkan tegangan *drop* pada sistem, perhitungan dapat mencapai titik konvergen dengan mudah seperti pada *well-conditioned case*. Karena beberapa teknik lanjutan untuk mengidentifikasi tegangan *drop* dari sistem [12]-[13] dan optimasi *power flow* untuk mengidentifikasi tegangan *drop* dari sistem [14]-[16] telah banyak ditemukan untuk mengatasi permasalahan *bifurcation point*. Metode-metode tersebut memperbolehkan hasil perhitungan *power flow* terlalu jauh dari inisiasi nilai awal yang dianggap menguntungkan untuk

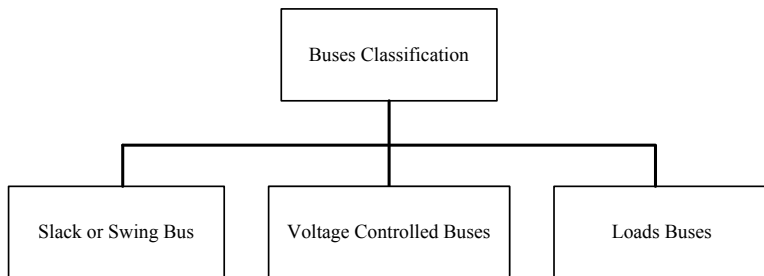
memperhitungkan nilai kestabilan tegangan dan tegangan *drop* dari sistem tenaga [12].

2.5.4 *Unsolvable case*

Pada kasus terakhir ini, hasil perhitungan *power flow* tidak dapat ditemukan atau tidak mencapai titik konvergen. Pada umumnya keadaan ini terjadi karena pembebanan dari sistem terlalu besar. Penggunaan solusi dari *bifurcation point* mungkin dapat diterapkan pada kasus ini. Tapi telah ditemukan metode alternatif untuk mengatasi *unsolvable case* pada analisa aliran daya seperti pada literatur [17]-[18]. Seperti dijelaskan pada literatur [17], *robust power flow* dapat menemukan titik yang mendekati titik konvergen dengan *error* yang kecil.

2.6 Klasifikasi Bus Sistem

Analisa aliran daya (*power flow analysis*) yang digunakan pada metode ini diasumsikan menggunakan beban konstan yang didefinisikan berdasar daya aktif dan daya reaktif yang dikonsumsi. Asumsi lebih lanjut menganggap tegangan terminal generator diatur dengan ketat, sehingga dianggap selalu konstan. Tujuan utama dari *power flow analysis* adalah menemukan magnitudo tegangan dari setiap bus beserta sudutnya ketika daya masuk di bus dan sebelum beban ditetapkan. Menurut [6], bus-bus pada sistem tenaga dapat diklasifikasikan sebagai berikut:



Gambar 2.3 Klasifikasi bus

Slack of Swing Bus : Bus ini umumnya diberikan nomor 1 untuk *power flow analysis*. Bus ini menjadi referensi sudut untuk bus lainnya. Karena perbedaan sudut antara dua sumber tegangan yang membedakan daya aktif dan daya reaktif diantara keduanya, sudut dari bus *slack* sendiri tidak terlalu penting. Meskipun tidak terlalu penting, sudut bus ini menjadi referensi sudut untuk tegangan bus lain yang sedang diukur.

Untuk alasan inilah sudut dari bus *swing* pada umumnya dipilih nilai 0° . Sehingga apabila dituliskan lengkap bus *swing* pada umumnya diasumsikan memiliki nilai $1\angle 0^\circ$.

Voltage Controlled Buses : Bus-bus ini adalah bus yang terkoneksi dengan generator/sumber tenaga. Sehingga daya yang dihasilkan pada bus ini dikontrol oleh *prime mover* sedangkan tegangan terminal generator yang dihasilkan dikontrol oleh sistem eksitasi generator. Alat untuk menjaga daya yang dihasilkan agar selalu konstan adalah *governor*, dan alat yang menjaga tegangan bus agar selalu konstan adalah *automatic voltage regulator*, dimana dilambangkan oleh P_{Gi} dan $|V_i|$ untuk bus-bus seperti ini. Itulah mengapa bus-bus seperti ini dinamakan juga dengan $P - V$ bus. Dan yang perlu diperhatikan adalah daya reaktif yang dihasilkan generator Q_{Gi} tergantung pada konfigurasi sistem dan perlu dilakukan spesifikasi lebih lanjut. Selain itu perlu dihitung nilai sudut dari tegangan δ_i yang belum diketahui.

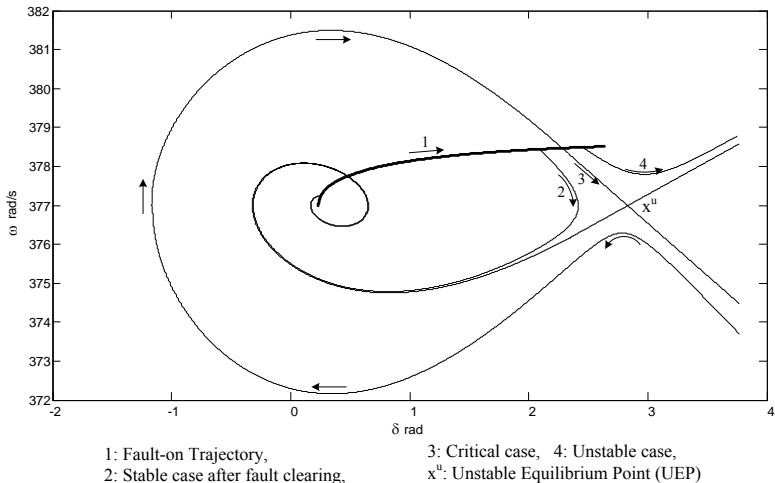
Load buses : Ini adalah bus beban, dimana tidak terdapat generator yang terkoneksi, maka daya aktif P_{Gi} dan reaktif Q_{Gi} yang dihasilkan oleh bus ini bernilai 0. Daya yang diambil oleh bus ini dilambangkan dengan $-P_{Li}$ untuk daya aktif dan $-Q_{Li}$ untuk daya reaktif (maksud tanda negatif melambangkan bahwa daya keluar dari bus, dan tidak masuk ke bus). Itulah mengapa bus seperti ini dinamakan juga dengan $P - Q$. Tujuan perhitungan *power flow* pada bus ini adalah menemukan nilai magnitudo tegangan $|V_i|$ dan sudutnya δ_i .

2.7 Waktu Pemutus Kritis (*Critical Clearing Time*)

CCT atau *Critical Clearing Time* adalah titik kritis dalam satuan *second* yang menjadi penentu suatu sistem tenaga listrik masih dalam keadaan stabil atau tidak. Apabila suatu sistem mengalami gangguan, maka area yang mengalami gangguan akan diisolasi dengan cara pemutus CB (*Circuit Breaker*). CB bekerja dengan koordinasi dari *relay* pengaman yang membutuhkan waktu paling cepat 0.1 *second* untuk beroperasi. Namun bila hanya melakukan pemutusan saluran seperti itu tidak menjamin sistem akan kembali ke keadaan stabil. Pemutusan yang dilakukan oleh CB harus kurang dari waktu pemutus kritis atau CCT nya untuk memastikan sistem kembali ke kondisi stabil. Dan sebaliknya, apabila sistem diputus lebih dari waktu pemutus kritisnya maka sistem akan berada pada keadaan tidak stabil yang lama kelamaan akan mengakibatkan kegagalan kerja generator lalu *blackout*.

2.8 Lintasan Kritis (*Critical Trajectory*)

Lintasan kritis atau *critical trajectory* didefinisikan sebagai lintasan yang dimulai dari titik pada *fault-on trajectory* (lintasan saat sistem sedang mengalami *fault*) dan mencapai titik kritis (*critical point*) yang memenuhi kondisi putus sinkron. Selain hal itu kondisi lain dimodifikasi untuk metode ini yaitu saat *critical point* mencapai CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*) untuk multi mesin [8]-[9]. Dan dari lintasan kritis ini dapat diamati kapan sistem masih stabil dan tidak dengan mengamati nilai CCT (*Critical Clearing Time*) yang didapatkan dengan cepat, karena apabila menggunakan metode konvensional yaitu TDS (*Time Domain Simulation*) biasanya tidak akurat dan memakan waktu lama dalam perhitungannya.



Gambar 2.4 *Critical trajectory* satu generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* [8]

Gambar 2.4 menunjukkan beberapa *trajectory* atau lintasan dari sebuah mesin sinkron atau generator sinkron yang terhubung dengan bus *infinite*. Lintasan nomor “1” menggambarkan *fault on trajectory* yaitu lintasan saat gangguan sedang terjadi. Lintasan nomor “2” menggambarkan sistem dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi. Lintasan nomor “4” menggambarkan sistem tidak dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi. Sedangkan lintasan nomor “3” adalah lintasan kritis (*critical trajectory*) suatu sistem tenaga listrik dan

merupakan batas antara keadaan stabil dan tidak stabil. Lalu lintasan kritis ini akan mencapai ke x^u atau UEP (*Unstable Equilibrium Point*) yang merupakan titik kritis dari sistem. Apabila jumlah mesin yang terhubung ke bus *infinite* lebih dari 1, maka titik kritisnya menjadi CUEP.

2.9 Kumparan peredam (*Damper Winding*)

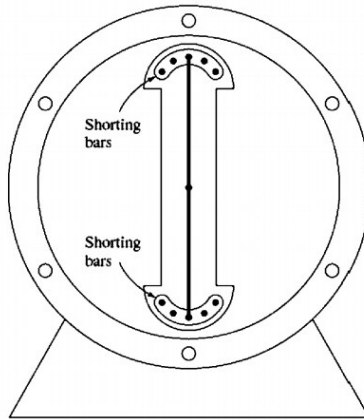
Sampai saat ini cara yang populer dan banyak digunakan untuk *starting* motor sinkron adalah dengan menggunakan kumparan peredam atau *damper winding*. Kumparan ini adalah batangan khusus yang terbuat dari plat besi yang diletakkan di slot slot yang ada pada dinding-dinding kutub rotor dari motor sinkron yang kemudian di-*short*-kan di setiap ujungnya oleh *shorting ring* yang besar [10]. Berikut beberapa gambaran dari *damper winding* yang telah dipasangkan pada rotor motor sinkron :



Gambar 2.5 *Damper Winding* setelah Dipasangkan pada *Single Salient Pole* [10]



Gambar 2.6 *Damper Winding* pada Permukaan Kutub Rotor Mesin Sinkron [10]



Gambar 2.7 Penggambaran Sederhana Rotor Dua Kutub Menonjol dengan *Damper Winding*

Untuk mengetahui apa efek dari *damper winding* pada motor sinkron, kita dapat mengamati dua kutub menonjol rotor pada Gambar 2.7. Rotor tersebut menunjukkan *damper winding* dengan *shorting bar* di setiap ujung dari kedua kutub rotor yang dihubungkan dengan kabel [10].

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

CRITICAL TRAJECTORY DENGAN CUEP

Metode *critical trajectory* memiliki beberapa langkah persamaan yang harus dipenuhi dan dilakukan untuk mendapatkan nilai CCT nya. Langkah-langkah tersebut akan dibahas di bab ini untuk menunjukkan perhitungan untuk mendapatkan nilai CCT.

3.1 Perhitungan Newton Raphson *Power Flow*

Setelah penjelasan awal mengenai *power flow* di bab sebelumnya, akan dibahas cara perhitungan *power flow* menggunakan metode Newton Raphson beserta seluruh prosedurnya di sub-bab ini.

3.1.1 Daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang masuk di bus

Untuk dapat merumuskan daya aktif dan reaktif yang memasuki bus, sebelumnya perlu didefinisikan hal-hal berikut. Misal tegangan pada bus i^{th} dilambangkan dengan:

Bentuk *rectangular* :

$$V_i = |V_i|(\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (3.1)$$

Bentuk *polar* :

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \quad (3.2)$$

Nilai identitas Euler :

$$V_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (3.3)$$

Nilai admitansi bus i terhadap dirinya sendiri :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| e^{j\theta_{ii}} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} = |Y_{ii}|(\cos \theta_{ii} + j \sin \theta_{ii}) \quad (3.4)$$

Rumus $G_{ii} = |Y_{ii}| \cos \theta_{ii}$ adalah konduktansi dan $B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ adalah susceptansi, dimana kita tahu induktansi adalah :

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (3.5)$$

Demikian pula nilai admitansi antara bus i dan bus j , dapat ditulis sebagai berikut :

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\theta_{ij}} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}|(\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) \quad (3.6)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.7)$$

Misalkan sistem memiliki sejumlah n bus. Maka arus yang masuk di bus ke- i adalah :

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + Y_{i3}V_3 + \dots + Y_{in}V_n \quad (3.8)$$

$$I_i = \sum_i^n \sum_j^n Y_{ij}V_j \quad (3.9)$$

Dari persamaan diatas diasumsikan arus yang masuk bus bernilai positif dan arus yang keluar dari bus bernilai negatif. Dengan asumsi tersebut maka daya aktif dan reaktif yang memasuki bus akan mendapatkan asumsi bernilai positif pula. Dan daya total atau daya semu untuk kondisi *lagging* (arus tertinggal oleh tegangan atau saat beban induktif) pada bus ke-*i* adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = \sum_i^n \sum_j^n V_i^* V_j Y_{ij} \quad (3.10)$$

Dan sebaliknya, daya total untuk kondisi *leading* (arus mendahului tegangan atau saat beban kapasitif) pada bus ke-*i* adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* = \sum_i^n \sum_j^n V_i^* V_j Y_{ij} \quad (3.11)$$

Tapi secara umum, sistem kelistrikan memiliki beban induktif dan mengakibatkan sistem berada pada kondisi *lagging*. Maka perumusan daya total dapat diturunkan dari persamaan (3.10) sebagai berikut :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i^* V_j Y_{ij}| \angle (-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.12)$$

Persamaan daya aktif dan reaktif di *power flow* dan dituliskan dalam bentuk *polar*, *rectangular*, dan bentuk *hybrid* (gabungan). Bentuk *polar* biasanya digunakan di metode Newton Raphson dan Fast Decoupled sedangkan *rectangular* digunakan di metode Gauss Seidel. Karena disini saya menggunakan metode Newton Raphson, maka yang digunakan di persamaan daya selanjutnya kebanyakan akan dijumpai dalam bentuk *polar*.

Berikut persamaan daya reaktifnya :

Bentuk *polar* :

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.13)$$

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.14)$$

Bentuk *rectangular* :

$$P_i = \text{Real} \left\{ V_i^* \sum_i^n \sum_j^n V_j Y_{ij} \right\} \quad (3.15)$$

Bentuk *hybrid* :

Berdasarkan persamaan (3.13), dapat diturunkan menjadi :

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos[-(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (3.16)$$

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.17)$$

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos[(\delta_i - \delta_j) - (\theta_{ij})] \quad (3.18)$$

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| [\cos(\delta_i - \delta_j) \cos(\theta_{ij}) + \sin(\delta_i - \delta_j) \sin(\theta_{ij})] \quad (3.19)$$

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\cos(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + \sin(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij})] \quad (3.20)$$

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\cos(\delta_i - \delta_j) G_{ij} + \sin(\delta_i - \delta_j) B_{ij}] \quad (3.21)$$

Dan berikut persamaan daya reaktifnya :

Bentuk *polar* :

$$Q_i = - \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.22)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.23)$$

Bentuk *rectangular* :

$$Q_i = -\text{Imaginer} \left\{ V_i^* \sum_i^n \sum_j^n V_j Y_{ij} \right\} \quad (3.24)$$

Bentuk *hybrid* :

Berdasarkan persamaan (3.22), dapat diturunkan menjadi :

$$Q_i = - \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin[-(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \quad (3.25)$$

$$Q_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (3.26)$$

$$Q_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin[(\delta_i - \delta_j) - (\theta_{ij})] \quad (3.27)$$

$$Q_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| [\sin(\delta_i - \delta_j) \cos(\theta_{ij}) + \cos(\delta_i - \delta_j) \sin(\theta_{ij})] \quad (3.28)$$

$$Q_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\sin(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + \cos(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij})] \quad (3.29)$$

$$Q_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\sin(\delta_i - \delta_j) G_{ij} + \cos(\delta_i - \delta_j) B_{ij}] \quad (3.30)$$

3.1.2 Perhitungan Error Daya Aktif dan Reaktif

Dimisalkan daya aktif dan reaktif yang diberikan di bus ke- i adalah P_{Gi} dan Q_{Gi} . Dan daya aktif dan reaktif yang dikonsumsi pada bus i^{th} adalah P_{Li} dan Q_{Li} . Maka jumlah bersih daya aktif yang diberikan di bus ke- i adalah :

$$P_{i,inj} = P_{Gi} - P_{Li} \quad (3.31)$$

Lalu dimisalkan jumlah daya aktif yang diberikan ke- i dari hasil perhitungan program *power flow* adalah $P_{i,calc}$. Maka error dari daya aktif asli dan perhitungan dengan program adalah :

$$\Delta P_i = P_{i,inj} - P_{i,calc} = P_{Gi} - P_{Li} - P_{i,calc} \quad (3.32)$$

Dengan cara yang sama bisa didapatkan error dari daya reaktif asli dan perhitungan dengan program *power flow* sebagai berikut :

$$\Delta Q_i = Q_{i,inj} - Q_{i,calc} = Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_{i,calc} \quad (3.33)$$

Sehingga tujuan dari *power flow* adalah untuk meminimalisasi 2 error dari persamaan (3.32) dan (3.33) tersebut. Persamaan (3.14) dan (3.23) adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung daya aktif dan daya reaktif pada persamaan (3.32) dan (3.33). Tapi bagaimanapun juga besar tegangan dan sudut-nya tidak kita ketahui (secara teori), maka dari itu digunakan permissalan pada awal perhitungan *power flow* yang diulang secara terus-menerus untuk *me-learning* nilai tegangan dan sudutnya menjadi nilai yang paling mendekati benar (error dalam batas

yang diinginkan) untuk nantinya dimasukkan dalam perhitungan mencari error daya aktif dan daya reaktif. Proses menghitung daya aktif dan reaktif juga melakukan proses iterasi secara terus menerus dalam perhitungannya hingga error berada dalam batas yang diijinkan. Setiap iterasi dilakukan akan didapat nilai error ΔP_i dan ΔQ_i yang juga akan semakin kecil hingga mendekati nol atau dalam batas yang diinginkan. Pada kondisi tersebut *power flow* dikatakan konvergen.

3.1.3 Jacobian Matrix pada Newton Raphson Power Flow

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai matriks Jacobian yang digunakan di *power flow* metode Newton Raphson. Berikut bagaimana cara memperoleh matriks Jacobian dan beberapa penyimbolan yang digunakan di matriks Jacobian. Matriks Jacobian secara umum ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta V_1}{|V_1|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_n}{|V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Dari persamaan (3.34) dapat diturunkan menjadi persamaan sederhana dengan notasi *HNJL* seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ J_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Notasi *HNJL* sendiri mengandung unsur-unsur sebagai berikut :

H adalah perubahan arah daya aktif terhadap sudut :

$$H_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i \quad (3.36)$$

N adalah perubahan arah daya aktif terhadap tegangan :

$$N_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.37)$$

J adalah perubahan arah daya reaktif terhadap sudut :

$$J_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i \quad (3.38)$$

L adalah perubahan arah daya aktif terhadap tegangan :

$$L_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (3.39)$$

Notasi $HNJL$ dapat disederhanakan dan diturunkan kembali untuk mempermudah perhitungan sebagai berikut :

Notasi H

Matriks diagonal :

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.40)$$

Matriks selain diagonal :

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = - \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.41)$$

Notasi N

Matriks diagonal :

$$N_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} |V_i| = 2|V_i|^2 G_{ii} + \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.42)$$

Matriks selain diagonal :

$$N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} |V_j| = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.43)$$

Notasi J

Matriks diagonal :

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.44)$$

Matriks selain diagonal :

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = - \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.45)$$

Notasi L

Matriks diagonal :

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} |V_i| = -2|V_i|^2 B_{ii} - \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.46)$$

Matriks selain diagonal :

$$L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} |V_j| = - \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.47)$$

Sedangkan aturan perhitungan notasi *HNJL* untuk bus adalah :

Bus swing atau bus slack :

Karena bus *swing* tidak diketahui daya aktif dan reaktifnya, maka bus *swing* atau *slack* tidak mempunyai komponen matriks Jacobian. Dengan kata lain pada bus ini nilai matriks *HNJL*-nya adalah nol.

Bus voltage control atau bus generator :

Pada bus *voltage control* diketahui daya aktif sedangkan daya reaktifnya tidak diketahui. Hal tersebut mengakibatkan matriks *H*-nya memiliki nilai sedangkan matriks lainnya bernilai nol.

Bus load atau bus beban :

Bus *load* atau bus beban memiliki nilai daya aktif dan daya reaktif, sehingga pada bus ini terdapat matriks *HNJL* secara utuh. Tapi jika bus beban tidak memiliki beban maka tidak akan memiliki nilai daya aktif dan reaktif, sehingga nilai matriks *HNJL* pada bus beban yang tidak berbeban juga nol seperti pada *swing* bus.

Pada tugas akhir ini, salah satu *plant* yang saya gunakan adalah *plant* dari Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus sesuai pada Gambar 3.1. Berikut perhitungan matriks Jacobian untuk sistem 3-generator 9-bus pada Gambar 3.1. Berdasarkan asumsi dari perhitungan, elemen diagonal dari matriks Jacobian yang tidak bernilai nol adalah :

$$H_{22}; H_{33}; H_{55}; H_{66}; H_{88}; N_{55}; N_{66}; N_{88}; J_{55}; J_{66}; J_{88}; L_{55}; L_{66}; L_{88}$$

Berdasarkan persamaan (3.40) – (3.47) dan Gambar 3.1, elemen matriks Jacobian seluruhnya dapat ditulis seperti berikut :

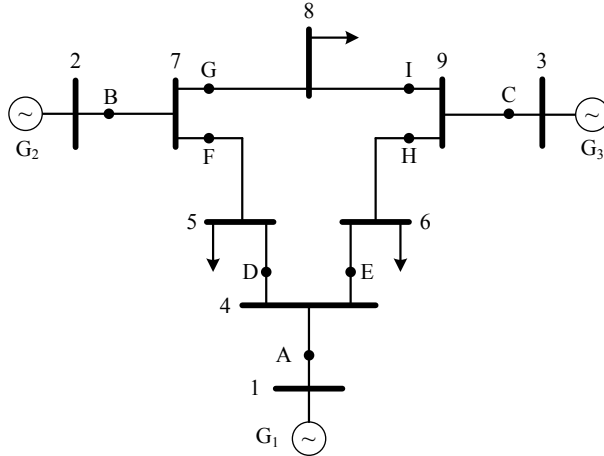
$$H = \begin{bmatrix} H_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{27} & 0 & 0 \\ 0 & H_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{39} \\ 0 & 0 & 0 & H_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{54} & H_{55} & 0 & H_{57} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_{66} & 0 & 0 & 0 \\ H_{72} & 0 & 0 & H_{75} & 0 & 0 & H_{78} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{87} & H_{88} & H_{89} \\ 0 & H_{93} & 0 & 0 & 0 & 0 & H_{98} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{54} & N_{55} & 0 & N_{57} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{75} & 0 & 0 & N_{78} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{87} & N_{88} & N_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{98} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{54} & J_{55} & 0 & J_{57} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_{75} & 0 & 0 & J_{78} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{87} & J_{88} & J_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{98} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{54} & L_{55} & 0 & L_{57} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{75} & 0 & 0 & L_{78} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{87} & L_{88} & L_{89} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{98} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Sesuai hasil diatas, dapat diamati bahwa matriks Jacobian memiliki banyak elemen yang bernilai nol, digunakan teknik *sparse matrix* yang berfungsi mereduksi elemen nol untuk mempersingkat waktu perhitungan.



Gambar 3.1 Sistem 3-generator 9-bus Fouad dan Anderson

3.1.4 Rangkuman perhitungan *power flow* metode Newton Raphson

Setelah penjabaran langkah-langkah *power flow* diatas, dapat dirangkum cara perhitungan *power flow* menggunakan metode Newton Raphson sebagai berikut:

1. Memilih nilai awal dari tegangan $|V|^{(0)}$ dari sejumlah n_p *load bus* dan sejumlah $n - 1$ sudut $\delta^{(0)}$ dari semua tegangan di setiap bus kecuali tegangan di *slack bus*.
2. Menggunakan nilai perkiraan $|V|^{(0)}$ dan $\delta^{(0)}$ untuk menghitung $n - 1$ jumlah daya aktif $P_{calc}^{(0)}$ yang diberikan pada setiap bus dan jumlah rugi-rugi atau error daya aktif $\Delta P^{(0)}$ yang hilang.
3. Menggunakan nilai perkiraan $|V|^{(0)}$ dan $\delta^{(0)}$ untuk menghitung sejumlah n_p daya reaktif $Q_{calc}^{(0)}$ yang diberikan pada setiap bus dan jumlah rugi-rugi atau error daya reaktif $\Delta Q^{(0)}$ yang hilang.
4. Menggunakan nilai perkiraan $|V|^{(0)}$ dan $\delta^{(0)}$ untuk membentuk *Jacobian Matrix* $J^{(0)}$.
5. Menyelesaikan persamaan (3.21) dan (3.30) untuk mendapatkan nilai $\delta^{(0)}$ dan nilai $\frac{\Delta|V|^{(0)}}{|V|^{(0)}}$.
6. Memperoleh nilai baru dari $\delta^{(k)}$ dan $\Delta|V|^{(k)}$:

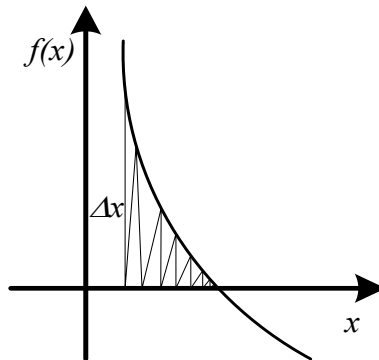
$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta\delta^k \quad (3.52)$$

$$|V|^{k+1} = |V|^k \left[1 + \frac{\Delta|V|^k}{|V|^k} \right] \quad (3.53)$$

7. Mengecek apakah semua error dibawah sesuai dalam batas yang diinginkan. Apabila error sudah dalam batas yang diijinkan maka pengerjaan akan dilanjutkan. Sebaliknya apabila error masih terlalu besar dan diluar batas yang diijinkan maka kembali ke nomor 1 untuk memulai iterasi dari awal dengan nilai baru dari persamaan (3.52) dan (3.53).

3.1.5 Kegagalan perhitungan Newton Raphson

Metode Newton Raphson secara umum akan mendapatkan hasil dan iterasi perhitungan konvergen atau memusat di satu titik dengan mudah sesuai pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Proses perhitungan Newton Raphson saat *well-conditioned case*

Tapi, kadang kesalahan terjadi di perhitungan Newton Raphson sehingga tidak akan mendapatkan hasil dan iterasi perhitungan tidak akan konvergen pada suatu titik, sehingga iterasi akan terus berjalan dan error tidak akan mencapai batas yang diinginkan karena akan selalu berkurang dan bertambah. Akibatnya perhitungan Newton Raphson tidak akan mencapai titik yang dituju, sesuai yang diilustrasikan pada Gambar 3.3. Menurut beberapa literatur ada banyak cara untuk menghindari kegagalan perhitungan Newton Raphson tersebut, berikut akan saya bahas salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengantisipasi kegagalan

perhitungan Newton Raphson. Sebelumnya persamaan perhitungan Newton Raphson dimodifikasi dan ditulis ulang seperti berikut:

$$x^{k+1} = x^k + \mu \Delta x \quad (3.54)$$

Dimana

$0 < \mu < 1$, untuk kondisi batas pada titik konvergen

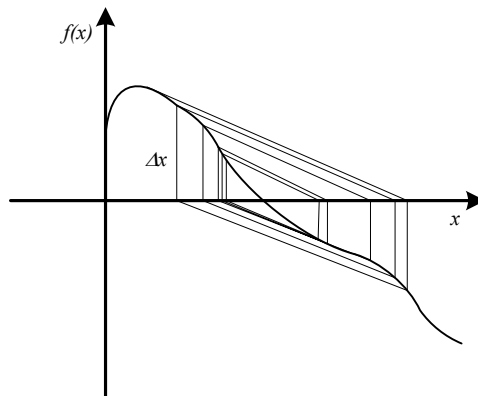
Lalu diset nilai *error* perhitungan *power flow* agar tidak lebih besar dari *error* sebelumnya dengan kondisi batas untuk *error* adalah:

$$|\Delta x| < c \quad (3.55)$$

Setelah kondisi batas ditambahkan, rumus untuk *error* $|\Delta x|$ dimodifikasi menjadi:

$$\|\Delta x\| = \frac{c}{|\Delta x|} \Delta x \quad (3.56)$$

Dimana c adalah nilai konstan yang diberikan untuk kondisi batas pada titik konvergen. Jika nilai $c > 1$, perhitungan seolah-olah terlihat lebih santai sehingga untuk mendapatkan titik konvergennya menjadi lebih mudah. Sebaliknya, jika nilai $c < 1$, perhitungan seolah-olah terlihat sangat ketat sehingga untuk mendapatkan titik konvergennya menjadi lebih sulit.



Gambar 3.3 Proses perhitungan Newton Raphson saat *ill-conditioned case*

3.2 Reduksi Matriks Jaringan

Reduksi matriks jaringan adalah algoritma berdasarkan matriks sensitivitas yang bertujuan untuk menyederhanakan sistem agar menjadi lebih mudah dan cepat saat dilakukan perhitungan pada *step* setelahnya. Jika dimisalkan matriks dari suatu sistem adalah sebagai berikut:

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (3.57)$$

Dimana:

I_{bus} = Nilai vektor dari arus yang masuk bus

V_{bus} = Nilai vektor dari tegangan bus yang diukur dari simpul / *node* / bus yang dijadikan sebagai referensi

Y_{bus} = Matriks admitansi bus

Ukuran dari *network* atau jaringan sistem dapat direduksi dengan cara menghilangkan bus yang bersifat pasif, yaitu bus yang tidak terkoneksi dengan beban ataupun generator. Tujuan dilakukannya reduksi ini adalah untuk menyederhanakan sistem sehingga menjadi lebih mudah dan cepat saat melakukan perhitungan pada *step* setelahnya. Jika jumlah seluruh bus pada sistem yang digunakan adalah n , dan $I_k = 0$ (maka bus k adalah bus pasif), *node* k dapat dihilangkan dengan cara mengganti elemen matriks pada kolom dan baris ke- $(n - 1)$ menggunakan rumus:

$$Y_{ij}^{(new)} = Y_{ij} - \frac{Y_{ik} Y_{kj}}{Y_{kk}} \quad (3.58)$$

untuk $i = 1, 2, \dots, k - 1, k + 1, \dots, n$ dan $j = 1, 2, \dots, k - 1, k + 1, \dots, n$

Dengan cara mengaplikasikan persamaan (3.58) pada seluruh sistem secara berturut-turut, nomor-nomor dari *node* pasif yang diinginkan bisa dieliminasi dengan mudah. Persamaan (3.58) adalah persamaan yang banyak digunakan dalam analisa *power flow* dan analisa kestabilan dinamis, yang bisa dimanfaatkan juga untuk analisa kestabilan transien untuk mencari nilai admitansinya. Persamaan tersebut dinamakan dengan persamaan reduksi Krone.

Dalam analisa kestabilan transien, semua bus dieleminasi kecuali bus internal generator lalu bisa didapatkan matriks admitansi Y dari sistem yang telah direduksi sebagai berikut:

$$I = YV \quad (3.59)$$

Dimana

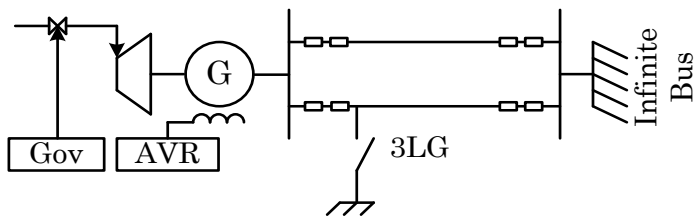
$$I = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rn} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ V_r \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Matriks di persamaan (3.60) adalah matriks reduksi Y . Dimensi dari matriks tersebut adalah $(n \times n)$, dimana n jumlah generator.

Setelah dilakukan reduksi jaringan, yang tersisa dalam perhitungan selanjutnya adalah bus-bus yang masuk di kondisi batas yang ditentukan dan bus asli yang mengandung komponen beban atau generator. Sistem tersebut dinamakan dengan *equivalents*. Sistem *equivalents* digunakan untuk jaringan yang luas seperti *plant* Jawa-Bali atau sejenisnya. Selain itu sistem *equivalents* juga digunakan untuk mempercepat waktu perhitungan. Karena pada dasarnya, mereduksi sistem besar menjadi sistem kecil yang setara lebih efisien daripada mereduksi sistem besar menjadi sistem *single equivalent* [11].

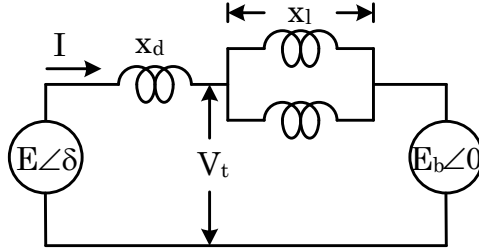
3.3 Pemodelan Sistem

Pada sub-bab ini akan dilakukan pemodelan dari sistem satu mesin/satu generator yang terhubung dengan bus *infinite*. Dalam pemodelan sederhana sistem dengan satu generator tersebut terdapat tambahan kontroler berupa AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dan *governor* yang menyuplai daya aktif dan daya reaktif melalui saluran transmisi *double circuit* (saluran ganda) yang terhubung dengan bus *infinite* sesuai dengan Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Generator sinkron dengan AVR dan governor terhubung *infinite bus*

Sebelum gangguan terjadi, sistem pada Gambar 3.4 dapat diilustrasikan dengan rangkaian sebagai berikut.



Gambar 3.5 Penggambaran sistem sebelum terjadi gangguan

Berdasarkan gambar diatas, dapat dirumuskan:

$$E = Ix_d + V_t \quad (3.61)$$

$$V_t = Ix_l + V_b \quad (3.62)$$

Jika kedua persamaan (3.61) dan (3.62) disubstitusikan, akan didapatkan:

$$E = I(x_d + x_l) + V_b \quad (3.63)$$

Lalu, didapatkan nilai I :

$$I = \frac{E - V_b}{x_d + x_l} \quad (3.64)$$

Jika reaktansi total $x = x_d + x_l$, persamaan (3.64) menjadi:

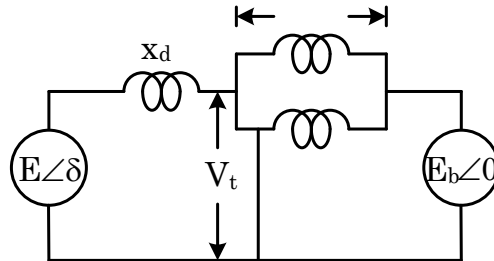
$$I = \frac{E - V_b}{x} \quad (3.65)$$

Berdasarkan persamaan (3.61)-(3.65), dapat didapatkan nilai V_t :

$$V_t = E - Ix_d = E - \frac{E - V_b}{x} x_d \quad (3.66)$$

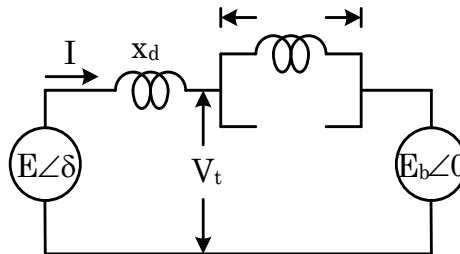
$$V_t = \frac{Ex_l + V_b x_d}{x} \quad (3.67)$$

Lalu dimisalkan terjadi gangguan pada saluran transmisi nomor 2 (posisi bawah) dari sistem, berikut penggambarannya:



Gambar 3.6 Penggambaran sistem saat terjadi gangguan di saluran transmisi ke-2

Setelah terjadi gangguan 3 – *L – Ground* pada saluran transmisi kedua sesuai pada Gambar 3.6, *circuit breaker* dari sistem akan membuka di kedua sisi (awal dan akhir) saluran transmisi kedua. Maka, pada keadaan setelah gangguan, generator sinkron hanya akan menyuplai daya aktif dan reaktif ke bus *infinite* melalui saluran transmisi *single circuit* (saluran tunggal). Keadaan sistem setelah terjadi gangguan dapat digambarkan seperti berikut:



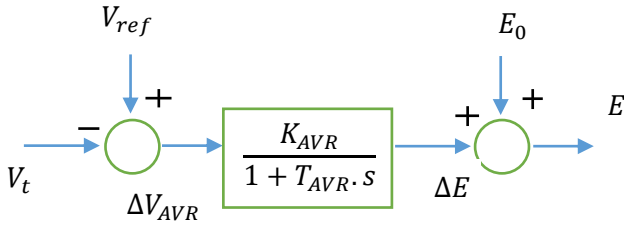
Gambar 3.7 Penggambaran sistem setelah gangguan di saluran transmisi ke-2 dihilangkan

3.4 Pemodelan Kontroler

Pada bagian ini akan dibahas efek penambahan komponen kontroler. Komponen kontroler yang dimaksud adalah pengontrol tegangan eksitasi (AVR) dan pengontrol kecepatan (*governor*) pada mesin sinkron. Dua permisalan yang digunakan yaitu sebuah AVR sederhana dan sebuah governor sederhana yang keduanya tertinggal 1 waktu di belakangnya.

3.4.1 Pemodelan AVR

Perubahan dari tegangan medan ΔE karena perubahan nilai E_0 atau E terjadi karena terjadi perubahan tegangan terminal generator ΔV_{AVR} karena perubahan nilai V_{ref} atau V_t . Selanjutnya diasumsikan *transducer* sempurna atau tidak tertinggal beberapa waktu ke belakang dan dimodifikasi dengan *transfer function* dari sistem eksitasi. Untuk menyederhanakan analisa, diasumsikan menggunakan model *voltage regulator* (AVR) dan sistem eksitasi yang sederhana. Pemodelan sesuai dengan Gambar 3.8 sebagai berikut :



Gambar 3.8 Blok diagram sistem AVR

Berdasarkan Gambar 3.8, dapat dibuat persamaan berikut :

$$\Delta E = \frac{K_{AVR}}{1 + T_{AVR} \cdot s} \Delta V_{AVR} \quad (3.68)$$

$$\Delta V_{AVR} = (V_{ref} - V_t) \quad (3.69)$$

$$E = (E_0 + \Delta E) \quad (3.70)$$

Lalu mensubstitusi persamaan (3.69) dan persamaan (3.70) ke (3.68), maka didapatkan :

$$\dot{E} = \frac{1}{T_{AVR}} [(E_0 - E) + K_{AVR}(V_{ref} - V_t)] \quad (3.71)$$

Dimana

K_{AVR} = Penguatan dari *regulator*

T_{AVR} = Waktu konstan dari *regulator*

Lalu dengan menginputkan $V_t = \frac{E x_t + V_b x_d}{x}$ sesuai pada teori, dan mengasumsikan $\dot{E} = 0$, maka didapatkan :

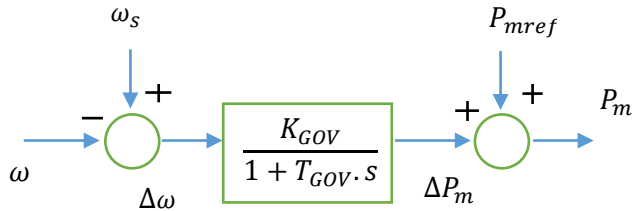
$$E = E_0 + K_{AVR} \left(V_{ref} - \frac{Ex_l + V_b x_d}{x} \right) \quad (3.72)$$

$$E = \frac{E_0 x + K_{VAR} V_{ref} x - K_{VAR} V_b x_d}{x + K_{VAR} x_l} \quad (3.73)$$

$$E = \frac{E_0 + K_{VAR} \left(V_{ref} - \frac{V_b x_d}{x} \right)}{1 + \frac{K_{VAR} x_l}{x}} \quad (3.74)$$

3.4.2 Pemodelan Governor

Perubahan dari kecepatan sudut mesin ω atau perubahan beban atau perubahan referensi kecepatan yang diproduksi sebagai daya mekanis P_m tergantung pada *speed droop* dan tergantung pada *transfer function* dari governor dan sumber energi. Pada pemodelan yang saya buat diasumsikan bahwa efek kombinasi dari turbin dan sistem governor adalah sedemikian rupa sehingga output daya mekanisnya dapat diilustrasikan sebagai berikut :



Gambar 3.9 Blok diagram sistem governor

Berdasarkan Gambar 3.9, dapat dibuat persamaan dalam satuan p.u seperti berikut :

$$\Delta P_m = \frac{K_{GOV}}{1 + T_{GOV} \cdot s} \Delta \omega \quad (3.75)$$

$$\Delta \omega = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (3.76)$$

$$P_m = P_{mref} + \Delta P_m \quad (3.77)$$

Lalu mensubstitusi persamaan (3.76) dan (3.77) ke persamaan (3.75), maka didapatkan :

$$\dot{P}_m = \frac{1}{T_{GOV}} \left[(P_{mref} - P_m) + K_{GOV} \left(\frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \right) \right] \quad (3.78)$$

Dimana

$$K_{GOV} = \text{Penguatan konstan} = \frac{1}{R}$$

$$T_{GOV} = \text{Waktu konstan dari governor}$$

3.5 Metode Runge-Kutta orde ke-4 untuk memodelkan kondisi *pre-fault* dan *on-fault* sistem

Sesuai literatur [2], metode Runge-Kutta dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial pada umumnya.

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (3.79)$$

Metode integrasi Runge-Kutta orde ke-4 telah banyak digunakan dalam pemodelan analisa kestabilan transien. Dimulai dari nilai awal $x(t - \Delta t)$, nilai titik integrasi (*slope*) sesuai Gambar 3.10-a dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\frac{\Delta x^{(1)}}{\Delta t} = [f(x(t - \Delta t)), t - \Delta t] \quad (3.80)$$

Sedangkan persamaan berikut digunakan untuk mendapatkan nilai pendekatan dari $x^{(1)}$ pada titik 1:

$$x^{(1)} = (x(t - \Delta t)) + \frac{1}{2} \Delta x^{(1)} \quad (3.81)$$

Selanjutnya nilai *slope* dihitung ulang di titik 1 pada Gambar 3.10-b dengan perhitungan:

$$\frac{\Delta x^{(2)}}{\Delta t} = \left[f(x^{(1)}), t - \frac{\Delta t}{2} \right] \quad (3.82)$$

Lalu persamaan berikut digunakan untuk mendapatkan nilai pendekatan dari $x^{(2)}$ di titik 2 pada Gambar 3.10-b:

$$x^{(2)} = (x(t - \Delta t)) + \frac{1}{2} \Delta x^{(2)} \quad (3.83)$$

Nilai *slope* kemudian dihitung untuk ketiga kalinya, yang sekarang berada di titik 2 pada Gambar 3.10-c:

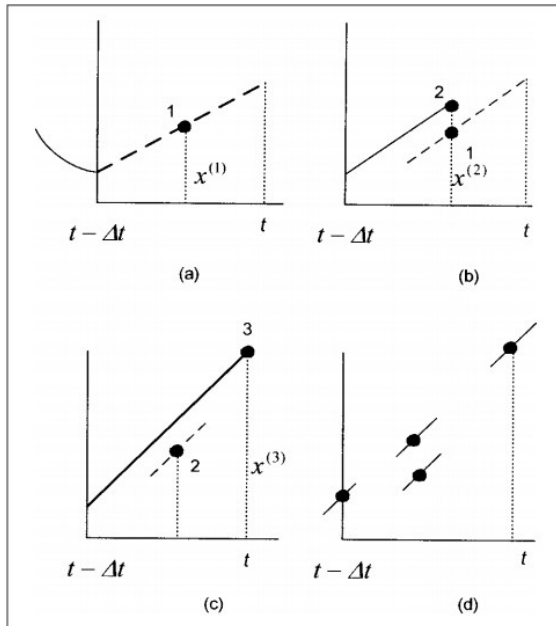
$$\frac{\Delta x^{(3)}}{\Delta t} = \left[\left(f(x^{(2)}) \right), t - \frac{\Delta t}{2} \right] \quad (3.84)$$

Dan iterasi berlanjut untuk mendapatkan nilai pendekatan di titik 3 pada gambar 3.10-c:

$$x^{(3)} = (x(t - \Delta t)) + \frac{1}{2} \Delta x^{(3)} \quad (3.85)$$

Kemudian untuk yang keempat kalinya, nilai *slope* dihitung ulang di titik 3 pada Gambar 3.10-d:

$$\frac{\Delta x^{(4)}}{\Delta t} = \left[\left(f(x^{(3)}) \right), t \right] \quad (3.86)$$



Gambar 3.10 Metode Runge-Kutta orde ke-4 [2]

Dari keempat nilai *slope* tersebut nilai akhir di t dapat ditemukan menggunakan pemberatan nilai rata-ratanya yaitu:

$$x(t) = x(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{6} \frac{\Delta x^{(1)}}{\Delta t} + 2 \frac{\Delta x^{(2)}}{\Delta t} + 2 \frac{\Delta x^{(3)}}{\Delta t} + \frac{\Delta x^{(4)}}{\Delta t} \quad (3.87)$$

3.6 Formulasi Metode

Pada metode yang diusulkan, terdapat beberapa *step* yaitu berupa metode-metode lain yang harus dilakukan untuk mendapatkan nilai yang diinginkan, yaitu nilai CCT. Berikut *step-step* yang digunakan:

3.6.1 Pendefinisian Awal

Permasalahan dari analisa kestabilan transien karena terjadi gangguan dapat diilustrasikan sebagai berikut. Pada awalnya, sistem beroperasi dalam kondisi stabil, dilambangkan dengan x_{pre} , ketika gangguan terjadi pada waktu $t = 0$. Lalu, sistem diatur oleh kestabilan dinamis *fault-on* saat sistem sedang mengalami gangguan $[0, \tau]$ seperti berikut:

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (3.88)$$

Dimana $x \in R^N$, $t \in R$, $f_F: R^N \rightarrow R^N$

Kurva solusi dari persamaan (3.88) dinamakan dengan *fault-on trajectory*, dan dirumuskan dengan:

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.89)$$

Dimana $X_F(t; x_{pre}): R \rightarrow R^N$

Gangguan berhasil dihilangkan pada waktu τ . Pada saat setelah itu, sistem diatur oleh kestabilan dinamis *post-fault* setelah sistem menghilangkan gangguan sesuai dengan persamaan nonlinear berikut:

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3.90)$$

Kurva solusi dari persamaan (3.90) dinamakan dengan *post-fault trajectory* yang dirumuskan dengan:

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0): R^N \rightarrow R^N \quad (3.91)$$

Dengan catatan bahwa titik awal x^0 adalah titik pada saat *fault-on trajectory* pada waktu τ . Maka persamaan (3.88)-(3.91) dapat disederhanakan menjadi formulasi sebagai berikut:

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.92)$$

3.6.2 Modifikasi Formulasi Trapezoidal

Pada sub-bab ini, akan dibahas mengenai modifikasi dari metode Trapezoidal. Metode Trapezoidal merupakan dasar untuk menyelesaikan metode *critical trajectory* yang digunakan pada tugas akhir ini. Dimisalkan solusi dari persamaan (3.90) pada waktu t^k dilambangkan dengan x^k . Maka persamaan berikut adalah persamaan Trapezoidal secara konvensional:

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.93)$$

Dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k)$$

Lambang k dimaksudkan nomor iterasi terhadap waktu.

Sesuai definisi yang dijabarkan pada bab sebelumnya, metode *critical trajectory* berarti gangguan pada sistem dapat dihilangkan pada saat CCT ditemukan dan *state variable* nya mencapai titik konvergen di titik kritisnya (*critical point*). Tapi pada beberapa kasus khusus, titik kritis cocok dengan UEP dan trajektori dapat mencapai UEP pada waktu tak hingga (*infinite time*). Gambar 3.11 mengilustrasikan *critical trajectory*, dimana dua titik dalam kondisi batas, x^0 dan x^u , merepresentasikan titik awal yaitu pada saat CCT dan titik kritisnya (*end point condition*). Kesulitan yang dialami untuk mendapatkan *critical trajectory* adalah waktu tak hingga diperlukan untuk mencapai UEP. Untuk menghindari permasalahan tersebut pada analisa kestabilan ini, modifikasi dari persamaan Trapezoidal ditemukan. Pertama-tama, jarak antara kedua titik pada persamaan (3.93) didefinisikan dengan:

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|(t^{k+1} - t^k) \quad (3.94)$$

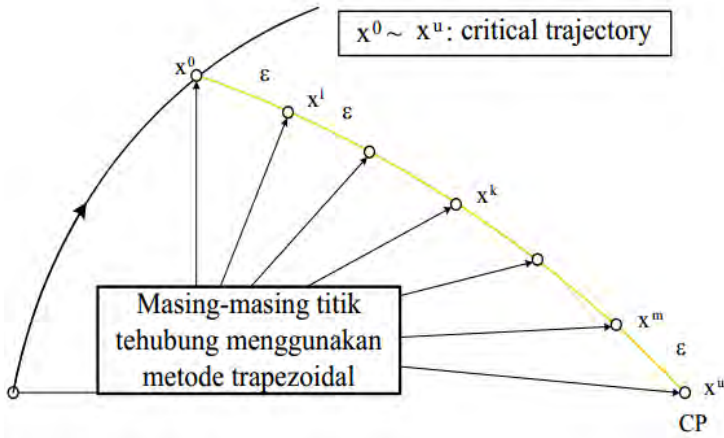
Setelah itu, waktu t pada persamaan (3.94) dapat dibawa ke domain jarak menjadi:

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.95)$$

Lalu persamaan (3.95) disubstitusikan pada (3.93) menjadi:

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.96)$$

Dengan persamaan (3.96), teknik integrasi numerik dalam domain waktu ditransformasi menjadi domain jarak. Dengan proses transformasi ini lebih memungkinkan untuk merepresentasikan *critical trajectory* dengan waktu berhingga dengan jarak yang sama sesuai pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Konsep modifikasi metode Trapezoidal

3.6.3 Kondisi Batas (*Boundary Conditions*)

Berdasarkan Gambar 3.11, kondisi batas artinya kondisi di titik awal atau “*initial point condition*”, x^0 , dan kondisi di titik akhir atau “*end point condition*”, x^u . Kedua kondisi tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. *Initial point condition*

Berdasarkan persamaan (3.92), titik awal terletak pada *fault-on trajectory* ketika gangguan berhasil dihilangkan di CCT.

$$x^0 = X_F(CCT; x_{pre}) \quad (3.97)$$

2. *End point condition*

Untuk keadaan satu mesin terhubung ke bus *infinite* seperti pada Gambar 2.5, *critical trajectory* dapat mencapai UEP yang terletak pada

saat sistem dalam keadaan *post-fault* dan direpresentasikan dengan x^u , yang memenuhi persamaan:

$$0 = f(x^u), \text{ dengan } x^u = [\theta^u, \tilde{\omega}^u] \quad (3.98)$$

Dan meskipun *critical trajectory* tidak dapat mencapai UEP pada sistem multi mesin, telah dilakukan pemeriksaan lengkap secara berkala untuk mengatasi permasalahan tersebut [8]-[9]. Dan dari pemeriksaan lengkap pada sistem multi mesin tersebut dapat disimpulkan bahwa, meskipun semua elemen x tidak mencapai x^u , ada beberapa pasangan elemen x yang tetap dapat mencapai kecocokan dengan elemen x^u . Hal itu menunjukkan bahwa kondisi berikut berlaku pada titik akhir, $m + 1$:

$$\theta_{cg}^{m+1} = \theta_{cg}^u, \quad \tilde{\omega}_{cg}^{m+1} = \tilde{\omega}_{cg}^u \quad (3.99)$$

Indeks cg merepresentasikan generator tertentu yang disini didefinisikan sebagai *critical generator* (generator kritis). Kedua kondisi diatas mengartikan bahwa hanya dua kondisi variable yang cocok dari *critical generator* (CG) yang mencapai UEP. Prosedur pemilihan CG akan dijelaskan lebih detail pada sub-bab selanjutnya.

Variabel x^u adalah CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*) yang memenuhi persamaan (3.98). Nilai CUEP ini, x^u , dijabarkan lebih lanjut pada literature lain seperti metode BCU (*Boundary Controlling UEP*) *Shadowing* [20].

3.6.4 Pemilihan *critical generator*

Pemilihan generator yang dijadikan sebagai generator kritis berperan penting pada metode *critical trajectory*. Setelah dilakukan berbagai pemeriksaan, ditemukan bahwa nilai energy potensial dari setiap generator dapat digunakan sebagai indeks untuk pemilihan *critical generator* [8]-[9]. Energi potensial pada persamaan *energy function* yang digunakan adalah:

$$Ep = \sum_i Ep_i \quad (3.100)$$

Dimana

$$Ep_i = [P_{mi} - (E_i)^2 G_{ii}][\theta_i - \theta_i^s] \quad (3.101)$$

Variabel E_i adalah tegangan konstan yang terletak di belakang sumbu reaktansi transien dari generator. Sedangkan G_{ii} adalah nilai

konduktansi penggerak dari generator. Huruf s merepresentasikan *Stable Equilibrium Point* (SEP), yaitu kondisi saat sistem dalam keadaan stabil. Dan Ep_i digunakan sebagai indeks untuk memilih CG.

Sehingga berdasarkan persamaan (3.100) dan (3.101), dapat disimpulkan bahwa generator dengan nilai energi potensial Ep terbesar dipilih menjadi generator kritis. Kedua persamaan diatas bekerja akurat untuk menentukan generator kritis dan telah dibuktikan dengan perhitungan manual oleh literatur [8]-[9].

3.6.5 Least Square Minimization

Berdasarkan modifikasi persamaan Trapezoidal pada Gambar 3.11 serta penentuan kondisi batas awal dan akhir seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, metode *least square minimization* memiliki perumusan secara umum sebagai berikut:

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \\ x^0 - X_F(CCT; x_{pre}) = 0 \\ x^u = [\theta_{cg}^u, \tilde{\omega}_{cg}^u] \end{cases} \quad (3.102)$$

Dimana variabel-variabelnya adalah:

$$X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau) \quad (3.103)$$

Persamaan diataslah yang menjadi inti dasar awalan untuk metode *critical trajectory* yang digunakan. Selanjutnya metode *least square minimization* diselesaikan menggunakan metode Newton Raphson. Dimana metode Newton Raphson membutuhkan masukan dari hasil perhitungan matriks Jacobian. Dan matriks Jacobian menggunakan metode *weighting matrix* untuk memastikan generator kritis agar masuk dalam perhitungan matriks Jacobian.

3.6.6 Matriks Jacobian

Ilustrasi dari matriks Jacobian untuk Xd' dari model generator menggunakan kontroler dan tanpa kontroler digambarkan pada Gambar 3.12 dan pada Gambar 3.13. Gambar 3.12 lebih menggambarkan tentang konfigurasi dan dimensi dari matriks Jacobian. Dimana Xd' generator tanpa kontroler dimisalkan dengan A , dan Xd' dari generator yang tidak menggunakan kontroler dimisalkan dengan B .

$$\begin{array}{c}
 \text{NODE x NG x (m+2)} \\
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \vdots \\ \omega_1^0 \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ \tilde{\omega}_{NG}^m \\ \theta^0 \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ \theta_{NG}^m \\ E_1^0 \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ \theta_{NG}^m \\ P_m \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ P_m \\ P_m \end{array}
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{NG x (m+2)} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ A\tilde{\omega}\tilde{\omega} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ A\theta\tilde{\omega} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ BE\tilde{\omega} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ B P_m \tilde{\omega} \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{NG x (m+2)} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ \theta^0 \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ \theta_{NG}^{m+1} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ BE\theta \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ B P_m \theta \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{NG x (m+2)} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ E_1^0 \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ E_{NG}^{m+1} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ BEE \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ B P_m E \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{NG x (m+2)} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ P_m^0 \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ P_m^{m+1} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ BE P_m \end{array} \\
 \begin{array}{c} \vdots \\ B P_m P_m \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 1 \\
 \varepsilon
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 1 \\
 \tau
 \end{array}
 \end{array}$$

NG = Number of Generator
 NODE= Number of Ordinary Differential Equation
 A = Xd' generator model
 B = Controllers

Gambar 3.12 Konfigurasi dan dimensi dari matriks Jacobian

$$\begin{array}{ccccccc}
A_i^{r+1,1} & B_i^{r+1,2} & \dots & \dots & C_i^{r+1,c+1} & D_i^{r+1,c+2} \\
A_i^{2,2} & B_i^{2,3} & & & C_i^{2,c+2} & D_i^{2,c+3} \\
\vdots & \ddots & & & \ddots & \ddots \\
& A_i^{m,m} & B_i^{n,m+1} & & C_i^{m,c+m} & D_i^{n,c+m+1} \\
& A_i^{m+1,m+1} & B_i^{m+1,m+2} & & C_i^{m+1,c+m+1} & D_i^{m+1,c+m+2} \\
\vdots & \ddots & \ddots & & & \\
C_i^{r+1,1} & D_i^{r+1,2} & \dots & \dots & A_i^{r+1,c+1} & B_i^{r+1,c+2} \\
C_i^{r+2,2} & D_i^{r+2,3} & & & A_i^{r+2,c+2} & B_i^{r+2,c+3} \\
& \ddots & & & \ddots & \ddots \\
& C_i^{r+m,m} & D_i^{r+m,m+1} & & A_i^{r+m,c+m+1} & B_i^{r+m,c+m+1} \\
& C_i^{r+m+1,m+1} & D_i^{r+m+1,m+2} & & A_i^{r+m+1,c+m+1} & B_i^{r+m+1,c+m+2} \\
E_i^{r,1} & & \ddots & & &
\end{array}
\quad F_i \quad G_i$$

Gambar 3.13 Konfigurasi dari matriks Jacobian secara detail

Jumlah variable dan persamaan secara umum adalah $NODE \times NG(m+2) + 2$ dan $NODE \times NG(m+2)$. Jumlah persamaan dan variable akan berubah tergantung dari *end point conditions*. Gambar 3.13 menjelaskan matriks Jacobian secara lebih detail. Berdasarkan Gambar 3.13, persamaan dari setiap indeks (A, B, C, D, E, F , dan G) dapat ditulis dengan perumusan sebagai berikut:

$$A = \frac{\partial G_i^k(X)}{\partial \tilde{\omega}_i^k} = \frac{\partial \left(x_i^{k+1} - x_i^k - \frac{\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|} \varepsilon \right)}{\partial \tilde{\omega}_i^k} \quad (3.104)$$

$$A = -I - \frac{\frac{\partial \tilde{\omega}_i^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\| - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \frac{\partial \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|}{\partial \tilde{\omega}_i^k}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2} \quad (3.105)$$

Dimana, $\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|$ adalah:

$$\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\| = \sqrt{(\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)} \quad (3.106)$$

Lalu, persamaannya dapat diturunkan menjadi:

$$\frac{\partial \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|}{\partial \tilde{\omega}_i^k} = \frac{\partial \sqrt{(\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}}{\partial \tilde{\omega}_i^k} \quad (3.107)$$

$$= \frac{1}{2} \left[(\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \right]^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T}{\partial \tilde{\omega}_i^k} (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) + (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial \tilde{\omega}_i^k} \right] \quad (3.108)$$

$$= \frac{1}{2} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^{-1} 2 (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial \tilde{\omega}_i^k} \quad (3.109)$$

$$= \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^{-1} (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial \tilde{\omega}_i^k} \quad (3.110)$$

Sehingga bila mensubstitusi persamaan (3.110) ke persamaan (3.105) akan didapatkan:

$$\frac{\partial G_i^k(X)}{\partial \hat{\omega}_i^k} = -I - \frac{\frac{\partial \hat{\omega}_i^k}{\partial \hat{\omega}_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\| - \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^{-1} (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial \hat{\omega}_i^k}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2} \varepsilon \quad (3.111)$$

$$= -I - \frac{\frac{\partial \hat{\omega}_i^k}{\partial \hat{\omega}_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial \hat{\omega}_i^k}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.112)$$

$$= -I - \frac{\frac{\partial \hat{\omega}_i^k}{\partial \hat{\omega}_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial (\hat{\omega}_i^{k+1} + \hat{\omega}_i^k)}{\partial \hat{\omega}_i^k} + \dots + \frac{\partial (pm_i^{k+1} + pm_i^k)}{\partial \hat{\omega}_i^k} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.113)$$

Dengan cara yang sama, persamaan dari B didapatkan:

$$B = \frac{\partial G_i^k(X)}{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}} = I - \frac{\frac{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}}{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.114)$$

$$= I - \frac{\frac{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}}{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial (\hat{\omega}_i^{k+1} + \hat{\omega}_i^k)}{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}} + \dots + \frac{\partial (pm_i^{k+1} + pm_i^k)}{\partial \hat{\omega}_i^{k+1}} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.115)$$

Cara tersebut juga digunakan untuk mencari indeks C :

$$C = \frac{\partial G_{yi}^k}{\partial z_i^k} = - \frac{\frac{\partial y_i^k}{\partial z_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial z_i^k}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.116)$$

$$= - \frac{\frac{\partial G_{yi}^k}{\partial z_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial (\hat{\omega}_i^{k+1} + \hat{\omega}_i^k)}{\partial z_i^k} + \dots + \frac{\partial (pm_i^{k+1} + pm_i^k)}{\partial z_i^k} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.117)$$

Serta untuk menentukan nilai dari indeks D dengan persamaan:

$$D = \frac{\partial G_{yi}^k}{\partial z_i^{k+1}} = - \frac{\frac{\partial y_i^k}{\partial z_i^{k+1}} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \frac{\partial (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)}{\partial z_i^{k+1}}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.118)$$

$$= - \frac{\frac{\partial G_{yi}^k}{\partial z_i^{k+1}} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial (\hat{\omega}_i^{k+1} + \hat{\omega}_i^k)}{\partial z_i^{k+1}} + \dots + \frac{\partial (pm_i^{k+1} + pm_i^k)}{\partial z_i^{k+1}} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.119)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{\theta i}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k} & \frac{\partial g_i}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial \theta_i^k} & \frac{\partial g_{\theta i}^k}{\partial \theta_i^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial \theta_i^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial \theta_i^k} & \frac{\partial g_i}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial E_i^k} & \frac{\partial g_{\theta i}^k}{\partial E_i^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial E_i^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial E_i^k} & \frac{\partial g_i}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial P_{mi}^k} & \frac{\partial g_{\theta i}^k}{\partial P_{mi}^k} & \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial P_{mi}^k} & \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial P_{mi}^k} & \frac{\partial g_i}{\partial \varepsilon} & 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \tilde{\omega}_i^0} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \\ 0 & \frac{\partial f}{\partial \theta_i^0} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \\ 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial E_i^0} & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial f}{\partial P_{mi}^0} & 0 & \frac{\partial f}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3.120)$$

Dimana

$$f_i = \begin{bmatrix} f_{\tilde{\omega}i} \\ f_{\theta i} \\ f_{Ei} \\ f_{Pmi} \end{bmatrix} = x_i^0 - X_F(CCT, x_{pre}) \quad g_i = \begin{bmatrix} g_{\tilde{\omega}i} \\ g_{\theta i} \\ g_{Ei} \\ g_{Pmi} \end{bmatrix} = x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \varepsilon$$

Lalu setiap variabel dari persamaan (3.120) dapat diturunkan menjadi seperti berikut:

$$\frac{\partial g_{\tilde{\omega}i}^k}{\partial \tilde{\omega}_i^k}, \frac{\partial g_{\theta i}^k}{\partial \theta_i^k}, \frac{\partial g_{Ei}^k}{\partial E_i^k}, \frac{\partial g_{Pmi}^k}{\partial P_{mi}^k}$$

$$\frac{\partial g_{yi}}{\partial y_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{yi}^0}{\partial y_i^0} & \frac{\partial g_{yi}^0}{\partial y_i^1} & & & 0 \\ & \frac{\partial g_{yi}^1}{\partial y_i^1} & \frac{\partial g_{yi}^1}{\partial y_i^2} & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \frac{\partial g_{yi}^{m-1}}{\partial y_i^{m-1}} & \frac{\partial g_{yi}^{m-1}}{\partial y_i^m} \\ 0 & & & & \frac{\partial g_{yi}^m}{\partial y_i^m} \end{bmatrix} \quad (3.121)$$

$$\frac{\partial g_{yi}^k}{\partial y_i^k} = -1 - \frac{\frac{\partial y_i^k}{\partial y_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial(\dot{\omega}_i^{k+1} + \dot{\omega}_i^k)}{\partial y_i^k} + \dots + \frac{\partial(p m_i^{k+1} + p m_i^k)}{\partial y_i^k} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.122)$$

$$\frac{\partial g_{yi}^k}{\partial y_i^{k+1}} = -1 - \frac{\frac{\partial y_i^k}{\partial y_i^{k+1}} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial(\dot{\omega}_i^{k+1} + \dot{\omega}_i^k)}{\partial y_i^{k+1}} + \dots + \frac{\partial(p m_i^{k+1} + p m_i^k)}{\partial y_i^{k+1}} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.123)$$

Dimana, variabel y adalah bagian dari variabel x.

$$\frac{\partial g_{\omega_i}^k}{\partial \theta_i^k}, \frac{\partial g_{\omega_i}^k}{\partial E_i^k}, \frac{\partial g_{\omega_i}^k}{\partial p m_i^k}, \frac{\partial g_{\theta_i}^k}{\partial \omega_i^k}, \frac{\partial g_{\theta_i}^k}{\partial E_i^k}, \frac{\partial g_{\theta_i}^k}{\partial p m_i^k}, \frac{\partial g_{E_i}^k}{\partial \omega_i^k}, \frac{\partial g_{E_i}^k}{\partial \theta_i^k}, \frac{\partial g_{E_i}^k}{\partial p m_i^k}, \frac{\partial g_{p m_i}^k}{\partial \omega_i^k}, \frac{\partial g_{p m_i}^k}{\partial \theta_i^k}, \frac{\partial g_{p m_i}^k}{\partial E_i^k}$$

$$\frac{\partial g_{yi}}{\partial z_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{yi}^0}{\partial z_i^0} & \frac{\partial g_{yi}^0}{\partial z_i^1} & & & 0 \\ & \frac{\partial g_{yi}^1}{\partial z_i^1} & \frac{\partial g_{yi}^1}{\partial z_i^2} & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & \frac{\partial g_{yi}^{m-1}}{\partial z_i^{m-1}} & \frac{\partial g_{yi}^{m-1}}{\partial z_i^m} \\ 0 & & & & \frac{\partial g_{yi}^m}{\partial z_i^m} \end{bmatrix} \quad (3.124)$$

$$\frac{\partial g_{yi}^k}{\partial z_i^k} = -1 - \frac{\frac{\partial y_i^k}{\partial z_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial(\dot{\omega}_i^{k+1} + \dot{\omega}_i^k)}{\partial z_i^k} + \dots + \frac{\partial(p m_i^{k+1} + p m_i^k)}{\partial z_i^k} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.125)$$

$$\frac{\partial g_{yi}^k}{\partial z_i^{k+1}} = -1 - \frac{\frac{\partial y_i^k}{\partial z_i^k} \|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^2 - (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k)^T (\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k) \left\{ \frac{\partial(\hat{\omega}_i^{k+1} + \hat{\omega}_i^k)}{\partial z_i^{k+1}} + \dots + \frac{\partial(Pm_i^{k+1} + Pm_i^k)}{\partial z_i^{k+1}} \right\}}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|^3} \varepsilon \quad (3.126)$$

Variabel z adalah bagian dari variabel x kecuali variabel y .

$$\begin{aligned} & \frac{\partial g_\delta}{\partial \varepsilon}, \frac{\partial g_\omega}{\partial \varepsilon}, \frac{\partial g_E}{\partial \varepsilon}, \frac{\partial g_{PM}}{\partial \varepsilon} \\ & \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{\tilde{\omega}_i}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial g_{\theta_i}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial g_{E_i}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial g_{Pmi}}{\partial \varepsilon} \end{bmatrix} = \frac{\partial g_i}{\partial \varepsilon} = - \frac{\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k}{\|\dot{x}_i^{k+1} + \dot{x}_i^k\|} \end{aligned} \quad (3.127)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f_{\tilde{\omega}_i}}{\partial \tilde{\omega}_i}, \frac{\partial f_{\theta_i}}{\partial \theta_i}, \frac{\partial f_{E_i}}{\partial E_i}, \frac{\partial f_{Pmi}}{\partial Pm_i} \\ & \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{\tilde{\omega}_i}}{\partial \tilde{\omega}_i} \\ \frac{\partial f_{\theta_i}}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial f_{E_i}}{\partial E_i} \\ \frac{\partial f_{Pmi}}{\partial Pm_i} \end{bmatrix} = \frac{\partial f}{\partial x} = [I \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \end{aligned} \quad (3.128)$$

$$\frac{\partial f_{\tilde{\omega}_i}}{\partial t}, \frac{\partial f_{\theta_i}}{\partial t}, \frac{\partial f_{E_i}}{\partial t}, \frac{\partial f_{Pmi}}{\partial t}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{\partial f}{\partial \omega} \\ \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{\partial f}{\partial t} \end{bmatrix} = \frac{\partial f}{\partial t} = -spline(X_F(CCT; X_{pre})) \quad (3.129)$$

3.6.7 Metode Newton Raphson

X_s diasumsikan sebagai penyelesaian dari $G(X)$. Lalu, X_s diberikan nilai awal X_0 serta nilai kesalahan perhitungan (*error*) ΔX .

$$X_s = X_0 + \Delta X \quad (3.130)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (3.130) ke $G(X)$ dan menurunkan persamaan deret Taylor dengan mempertimbangkan dua orde persamaan aslinya (persamaan setelah orde ke-3 diabaikan), dapat dirumuskan:

$$G(X_0 + \Delta X) \cong G(X_0) + \left[\frac{\partial G(X_0)}{\partial X} \right] \Delta X \quad (3.131)$$

Ketika *error* dari persamaan (3.131) terlalu kecil, yaitu mendekati nol, dan $G(X_s) = 0$, persamaan (3.131) dapat ditulis ulang menjadi:

$$G(X_0) + J\Delta X \cong 0 \quad (3.132)$$

Dimana, J adalah matriks Jacobian yang dibahas pada sub-bab sebelumnya. Dengan rumus J :

$$J = \frac{\partial G(X)}{\partial X} \quad (3.133)$$

Lalu *error* yang selanjutnya dimasukkan untuk asumsi nilai inisiasi awal, b :

$$b = G(X_0) \quad (3.134)$$

Maka *error* keseluruhan yang digunakan pada matriks Jacobian:

$$\varepsilon = J\Delta X + b \quad (3.135)$$

Error ε yang menjadi matriks *square* diminimalisasi menjadi:

$$f = \varepsilon^T \varepsilon \quad (3.136)$$

Lalu dengan mensubstitusi persamaan (3.135) ke persamaan (3.136), maka didapatkan:

$$f = (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b) \quad (3.137)$$

Berdasar persamaan (3.137), nilai ΔX dapat diturunkan menjadi:

$$f' = J^T (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b) J = 0 \quad (3.138)$$

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T b \quad (3.139)$$

Dan persamaan (3.134) dapat disubstitusikan ke (3.139):

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T G(X_0) \quad (3.140)$$

Maka dengan memperbarui nilai penyelesaian awal X_s dengan cara menambahkan *error* ΔX , nilai penyelesaian baru didapatkan:

$$X_{new} = X_{old} + \Delta X \quad (3.141)$$

Kondisi konvergen dicapai ketika nilai ΔX sudah bernilai cukup kecil, yaitu sudah berada dalam kondisi batas yang ditentukan.

3.6.8 Critical Trajectory dengan metode CUEP

Berdasarkan pembahasan yang dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, permasalahan untuk menyimulasikan keadaan kritis dan mendapatkan titik kritis pada analisa kestabilan transien dapat dirumuskan ulang sebagai berikut:

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\} \quad (3.142)$$

Dimana $x^k \in R^N, (k = 0, \dots, m), \varepsilon \in R, \tau \in R$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.143)$$

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.144)$$

Dengan kondisi batasnya:

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.145)$$

$$\mu^{m+1} = x^{m+1} - x^u \text{ dengan } f(x^u) = 0 \quad (3.146)$$

Setelah dilakukan minimisasi dari persamaan (3.142), μ^k secara ideal akan bernilai nol pada persamaan (3.143), sesuai dengan modifikasi persamaan Trapezoidal yang dilakukan sebelumnya (3.96), yang menghubungkan semua titik $x^k, k = 0$ to $m + 1$, sesuai pada Gambar 3.11.

Pengaturan dari W sangat penting pada metode ini untuk dapat memberikan kondisi sesuai persamaan (3.99). Dimana W sendiri adalah matriks diagonal pemberat (*square weighting matrix*) dengan nilai positif untuk persamaan (3.146) yang didapatkan dari perhitungan matriks Jacobian (3.120)-(3.129). Konsep dari *weighting matrix* adalah memberikan nilai yang sangat besar untuk generator yang ditetapkan sebagai CG, dan memberikan nilai yang sangat kecil untuk generator lainnya untuk memberikan keadaan UEP dimana elemen yang dapat mencapainya adalah $x^{m+1} = x^u$. Nilai yang diberikan pada CG adalah 10000 dan untuk generator yang lainnya diberikan nilai sangat kecil yang sama. Persamaan (3.145), yaitu kondisi batas untuk nilai inisial awal, menggambarkan *fault-on trajectory* sebagai fungsi waktu pemutus kritis (CCT), yaitu τ .

Kondisi batas akhir (*end point condition*) pada metode ini merupakan tambahan jika dibandingkan dengan metode konvensional *numerical integration*, yaitu metode yang digunakan sebagai formulasi nilai awal pada metode ini. Dalam metode konvensional, *error* μ^k diakumulasi seiring bertambahnya k sehingga titik akhir (x^u) memiliki kesalahan yang cukup besar. Tapi dalam metode ini, sesuai persamaan yang dihasilkan untuk titik akhir (3.146), menyelesaikan persamaan berlebih di setiap titik dengan minimisasi sehingga *error* μ^k tersebar di setiap titik dengan merata, dan titik akhir memiliki kesalahan yang kecil.

Solusi persamaan (3.142)-(3.146) dapat diinterpretasikan seperti berikut. Nilai di setiap titik, $x^k, k = 0$ to $m + 1$, merepresentasikan *critical trajectory*, dimana ε akan otomatis ditemukan ketika nomor integrasi, m , ditentukan. Setelah perhitungan dilakukan, CCT dan titik kritis akan didapatkan sebagai τ dan x^{m+1} sebagai solusinya. Dengan catatan bahwa metode ini menghasilkan titik secara tepat, dan bukan perkiraan titik dalam suatu *range* seperti pada metode konvensional. Dan m merupakan parameter penting yang mempengaruhi akurasi dan waktu perhitungan untuk metode *critical trajectory*.

BAB IV SIMULASI DAN ANALISA DATA

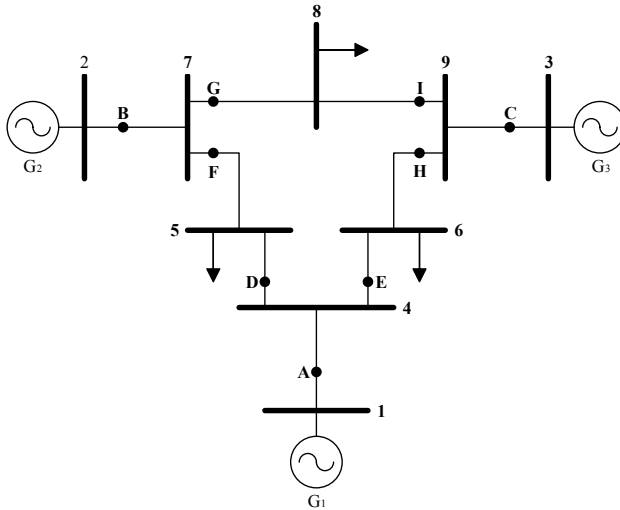
Pada bab keempat ini, akan dilakukan simulasi pada *plant*/sistem dengan multi mesin/multi generator. *Plant* yang digunakan adalah Fouad dan Anderson 3-generator 9-bus serta *plant* IEEE 6-generator 30-bus dengan mempertimbangkan AVR dan *governor* pada setiap mesinnya.

Kelebihan dari metode yang diusulkan adalah memberikan nilai CCT dengan lebih cepat dan tepat dibandingkan metode konvensional TDS. Oleh karena itu spesifikasi dari perangkat yang digunakan untuk menyimulasikan metode *critical trajectory* sangat berpengaruh pada kecepatan proses iterasinya, mengingat metode yang diusulkan terdiri dari beberapa metode. Berikut spesifikasi dari perangkat yang digunakan untuk menjalankan simulasi di Matlab:

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. <i>System Manufacturer</i> | : ASUSTeK Computer Inc. |
| 2. <i>System Model</i> | : N55SL |
| 3. BIOS | : BIOS Date: 06/20/12 14:28:31
Ver: 04.06.03 |
| 4. <i>Processor</i> | : Intel® Core™ i7-2670QM
CPU @ 2.20GHz (8 CPUs) |
| 5. <i>Memory</i> | : 8192MB RAM |
| 6. <i>Operating System</i> | : Windows 8.1 Pro 64-bit
(6.3, Build 9600) |
| 7. <i>Product ID</i> | : XRTNK-WDYV8-7THJ8-QCFD8-K2BQH |

4.1 CCT pada Sistem 3-generator Fouad dan Anderson dengan Mempertimbangkan Kontroler

Metode *critical trajectory* akan diterapkan pada *plant* Fouad dan Anderson 3 generator 9 bus. Setelah menjalankan program BCU-*Shadowing* maka didapatkan nilai CUEP dan indeks energi potensial dari setiap generator yang ada. Sehingga generator yang akan dijadikan sebagai generator kritis sudah ditemukan untuk nantinya dimasukkan pada *weighting matrix*. Berikut *single line diagram* dari sistem tersebut:



Gambar 4.1 Sistem 3-generator 9-bus Fouad dan Anderson

Dari Gambar 4.1 telah ditentukan letak gangguan terjadi, yaitu di masing-masing titik pada saluran transmisi dengan kode A-I. Gangguan diasumsikan terjadi di 9 titik saluran transmisi tersebut, dengan asumsi:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 4, dekat bus 1
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7, dekat bus 2
- C : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9, dekat bus 3
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- E : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6, dekat bus 4
- F : titik gangguan antara bus 5 dan bus 7, dekat bus 7
- G : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 9
- I : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9, dekat bus 9

Sedangkan untuk spesifikasi data dari saluran transmisi sistem dan spesifikasi data dari bus sistem dilampirkan secara berturut-turut pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

4.1.1 Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT

Terdapat beberapa parameter yang harus diinputkan terlebih dahulu sebelum dapat dilakukan perhitungan CCT. Parameter-parameter tersebut didapatkan setelah dilakukan perhitungan analisa aliran daya. Be-

Tabel 4.1 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson

No.	Bus asal	Bus dituju	R	X	Half Line Charging Susceptance (p.u)
1	1	4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6	9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7	8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.2 Spesifikasi data bus sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	200,00	0,00	0,00	0,00
2	163,00	0,00	0,00	0,00
3	85,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	125,00	50,00
6	0,00	0,00	90,00	30,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	100,00	35,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00

rikut dilampirkan parameter yang didapatkan dari sistem, untuk di-inputkan pada perhitungan selanjutnya. Parameter tersebut antara lain :

1. Daya mekanis generator (P_m)
2. Tegangan bus generator (V)
3. Daya total generator (S)
4. Tegangan generator (E_a)

Tabel 4.3 Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa *power flow*

Generator	P_m (p. u)	V (p. u)	S (p. u)	E_a (p. u)
1	0,7164	1,0400	0,7164+j0,2705	1,0400
2	1,6300	0,3821	1,6300+j0,3700	1,1145
3	0,8500	0,6667	0,8500+j0,0181	1,0528

Setelah didapatkan parameter-parameter sesuai pada Tabel 4.3, dapat dikerjakan perhitungan untuk menentukan nilai CCT pada masing-masing titik gangguan.

4.1.2 Perhitungan CCT pada sistem 3 generator 9 bus Fouad dan Anderson tanpa *damping*

Untuk membuktikan keefektifan dari metode yang diajukan, pada kali ini metode coba diterapkan pada sistem 3 generator 9 bus dari Fouad Anderson sesuai Gambar 4.1. Pada desain *single line diagram* tersebut, diasumsikan setiap saluran transmisi adalah *double circuit*/saluran ganda, dan gangguan 3 fasa terjadi di bus yang lebih dekat dengan titik gangguan pada salah satu saluran transmisinya. Dan beberapa saat kemudian, gangguan dapat dihilangkan dengan membuka CB di kedua ujung saluran transmisinya, sesuai penjelasan pada sub-bab 3.3.

Selanjutnya setelah mendapatkan semua parameter awal yang diperlukan dari analisa *power flow*, dan setelah dilakukan reduksi matriks jaringan untuk mempercepat perhitungan, dilakukan metode Runge-Kutta orde ke-4 untuk memodelkan sistem sebelum terjadi gangguan (sama seperti metode *numerical integration*/TDS) dengan *time step* 0,001 *sec*. Lalu, diasumsikan gangguan terjadi, dan *fault-on trajectory* dapat ditemukan pula dengan metode TDS, yang disimpan sebagai $x^0(\tau)$ sebagai fungsi waktu, dan τ pada memori computer yang melakukan *running*. Lalu, $x^0(\tau)$ dengan nilai τ tertentu dipilih sebagai kondisi awal untuk menyimulasikan kondisi dinamis sekaligus pengevaluasi stabilitas dari sistem. Proses tersebut dilakukan secara terus menerus dengan mengganti-ganti nilai dari τ , dimana proses tersebut lebih dikenal dengan istilah iterasi. Metode pencarian biner pangkat tiga dari *spline* digunakan untuk menentukan nilai kritis dari τ , yaitu CCT.

Simulasi yang akan dilakukan berikut mengabaikan koefisien *damping* yang terdapat pada setiap generator. Lalu metode *critical trajectory* akan dibandingkan pula dengan metode konvensional TDS untuk dianalisa error serta beberapa aspek lainnya. Nilai CCT hasil perbandingan kedua metode tersebut dilampirkan pada Tabel 4.4 berikut. Hasil perhitungan pada tabel tersebut menyatakan bahwa nilai CCT berbeda di setiap titik gangguannya. Misalkan, pada gangguan A, CCT dari metode TDS adalah 0,37-0,38. Hal itu berarti sistem stabil sampai detik 0,37 dan sudah tidak stabil saat detik 0,38. Maka dapat diamati

bahwa nilai CCT dari *critical trajectory* akan berada diantara *range* waktu dari hasil simulasi TDS tersebut.

Tabel 4.4 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping*

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,3744	0,3757	0,37-0,38	112,20	0,0
B	2-7	0,2306	0,3816	0,22-0,23	112,28	+0,3
C	3-9	0,2833	0,3941	0,28-0,29	112,49	0,0
D	4-5	0,3530	0,4674	0,35-0,36	112,33	0,0
E	4-6	0,3530	0,4629	0,35-0,36	112,08	0,0
F	5-7	0,2392	0,3598	0,23-0,24	112,51	0,0
G	7-8	0,2457	0,3751	0,24-0,25	112,42	0,0
H	6-9	0,2748	0,4308	0,27-0,28	112,37	0,0
I	8-9	0,2842	0,6450	0,28-0,29	112,34	0,0

Waktu simulasi (CPU *time*) tergantung dari kecepatan processor dan spesifikasi dari perangkat yang digunakan. Waktu simulasi dari metode konvensional TDS lebih lama 10 kali lipat daripada metode *critical trajectory* untuk mendapatkan nilai CCT-nya, dan didapatkan dengan cara *trial and error* untuk setiap titik gangguan. Bila diasumsikan untuk mendapatkan *range* waktu stabil dan tidak stabilnya membutuhkan 10 kali percobaan dimana di setiap percobaannya diasumsikan membutuhkan waktu 10 detik ditambah waktu *running* programnya, maka dapat dirumuskan waktu simulasi (CPU *time*) untuk mendapatkan *range* waktu antara stabil dan tidak stabilnya adalah:

$$CPU[s] = 10 \times (10 + \text{waktu running program})$$

Sedangkan waktu simulasi dari metode *critical trajectory* didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Nilai *error* didapatkan dari selisih nilai CCT hasil perhitungan metode *critical trajectory* dan batas bawah *range* stabil (*rs*) atau batas atas *range* tidak stabil (*ru*) hasil perhitungan metode TDS. Apabila nilai CCT berada lebih dari *range* tidak stabil maka menggunakan *ru*,

sedangkan apabila nilai CCT berada kurang dari range stabil maka menggunakan ru . Sehingga $error$ bisa bernilai positif atau negatif. Berikut perumusan untuk mencari nilai $error$ -nya saat bernilai positif:

$$error(+) = \frac{CCT - ru}{ru}$$

Dan berikut perumusan untuk mencari nilai $error$ -nya saat bernilai negatif:

$$error(-) = \frac{CCT - rs}{rs}$$

Sesuai Tabel 4.4, dapat diamati bahwa nilai $error$ setiap titik adalah 0%, kecuali pada titik gangguan B $error$ -nya bernilai +0,3%. Meskipun pada titik gangguan tersebut terjadi $error$, tapi nilai dari $error$ tidak terlalu besar dan tidak lebih dari $\pm 0,5\%$, yang berarti bahwa setting nilai CCT-nya masih aman untuk diterapkan pada sistem.

4.1.3 Analisis grafik pada sistem 3 generator 9 bus Fouad dan Anderson tanpa *damping*

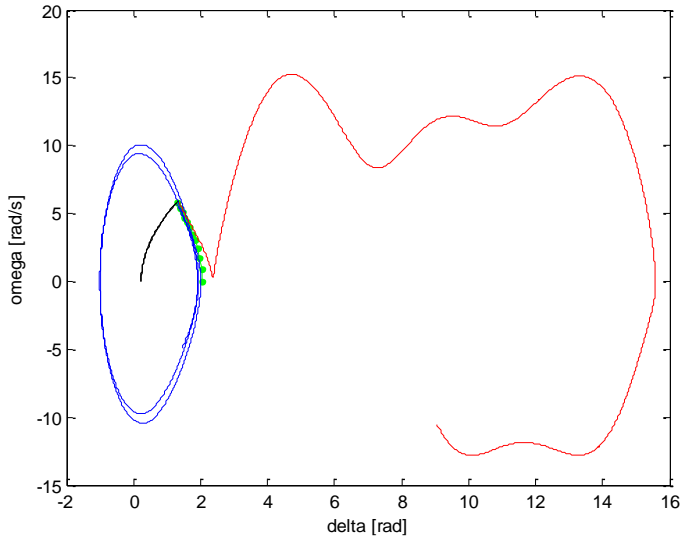
Pada Gambar 4.2 – Gambar 4.28 dilampirkan grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson tanpa mempertimbangkan koefisien *damping* pada perhitungannya. Grafik yang ditampilkan dibatasi grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (sec), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (sec), karena grafik daya mekanis (P_m) terhadap waktu (sec) dan grafik tegangan internal generator (E_a) terhadap waktu (sec) terlalu sulit untuk dibedakan kondisi stabil dan kondisi tidak stabilnya. Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang digunakan untuk *plotting*. Warna pada ketiga kurva tersebut dapat dijelaskan:

- a. Merah : kurva kondisi tidak stabil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode konvensional TDS
- b. Biru : kurva kondisi stabil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode konvensional TDS
- c. Hijau : kurva yang didapatkan dari perhitungan menggunakan metode *critical trajectory*

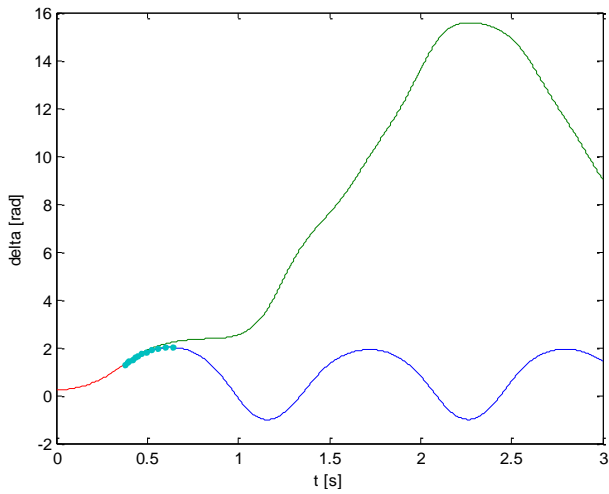
Maka hasil simulasi dengan menggunakan metode *critical trajectory* pada setiap titik gangguan pada sistem adalah sebagai berikut.

a. Titik Gangguan A

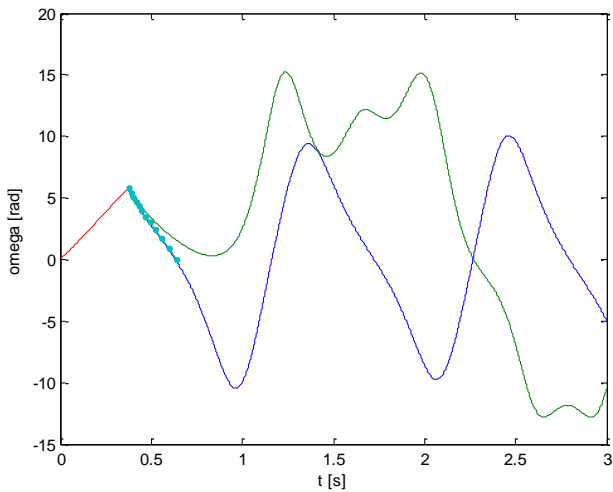
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3744 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,37 – 0,38) sec.



Gambar 4.2. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila mengalami gangguan di titik A



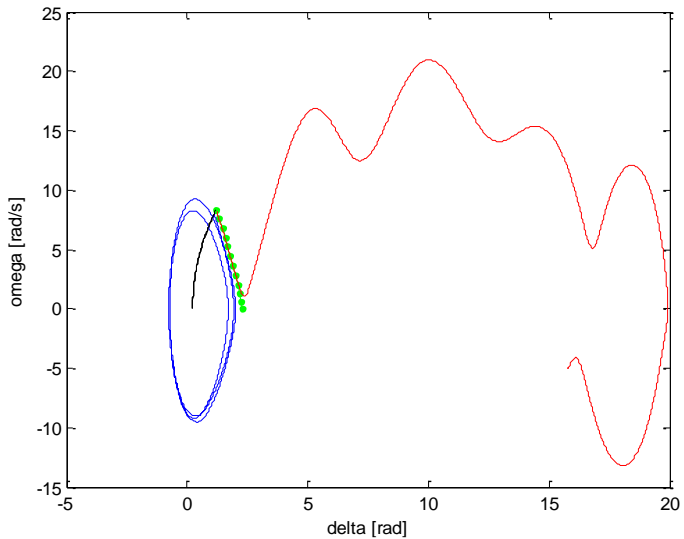
Gambar 4.3. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik A



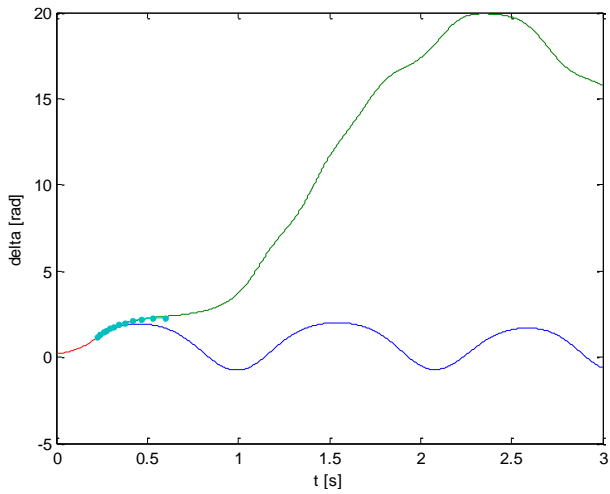
Gambar 4.4. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik A

b. Titik Gangguan B

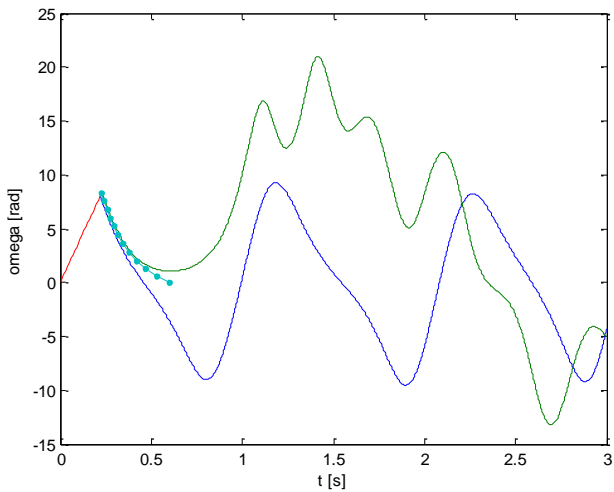
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2306 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah *range* antara (0,22 – 0,23) sec.



Gambar 4.5. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik B



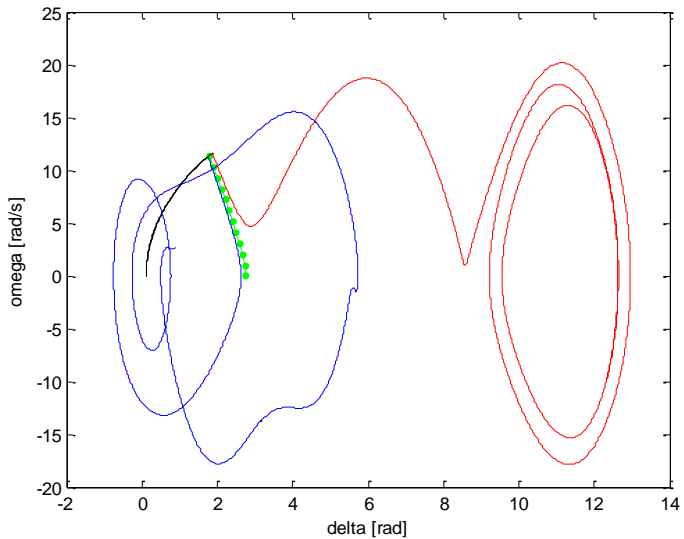
Gambar 4.6. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik B



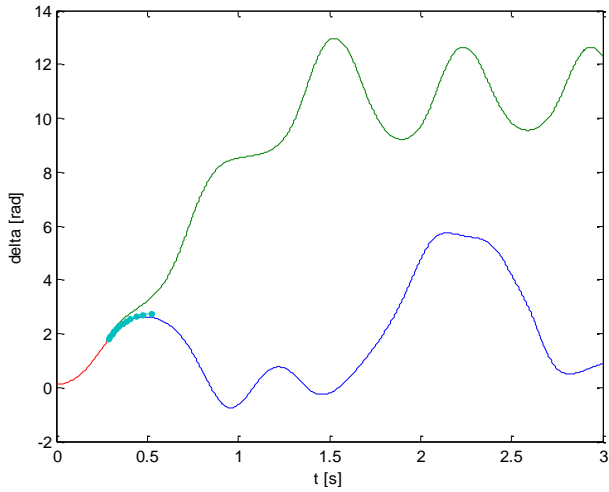
Gambar 4.7. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik B

c. Titik Gangguan C

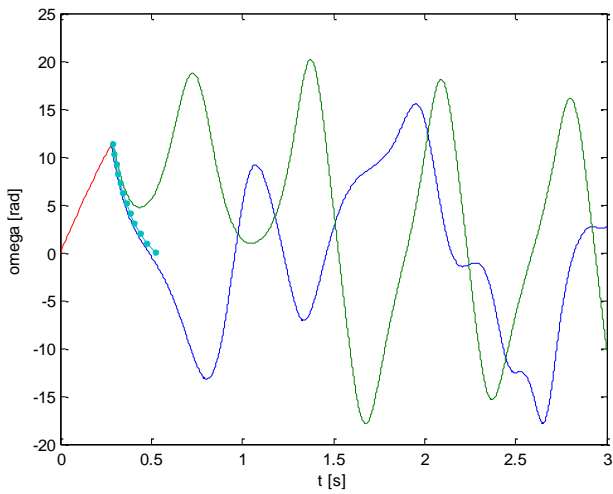
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2833 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,28 – 0,29) sec.



Gambar 4.8. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik C



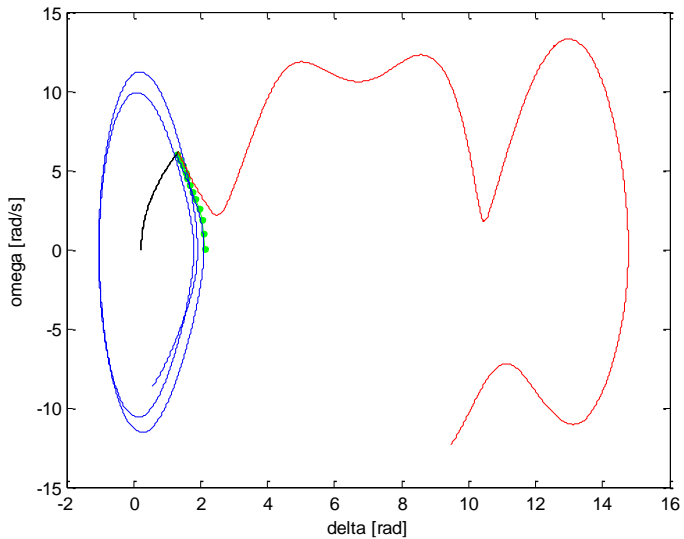
Gambar 4.9. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik C



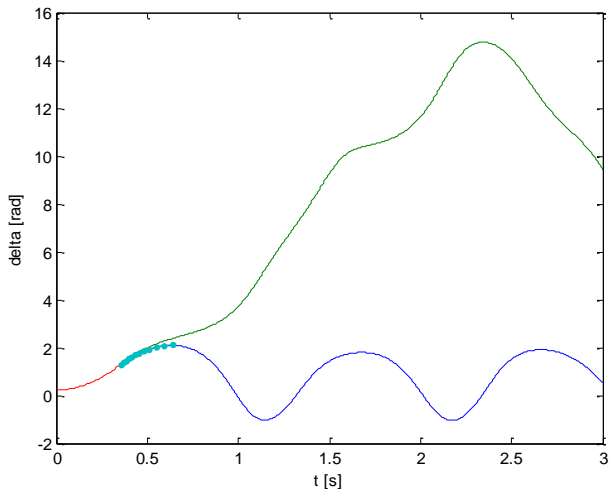
Gambar 4.10. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik C

d. Titik Gangguan D

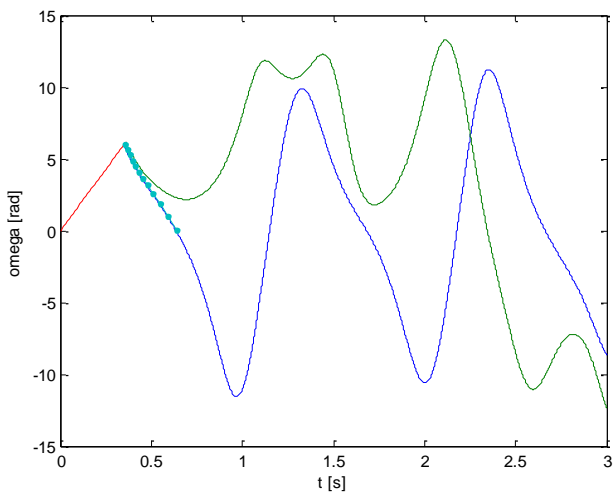
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3530 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,35 – 0,36) sec.



Gambar 4.11. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik D



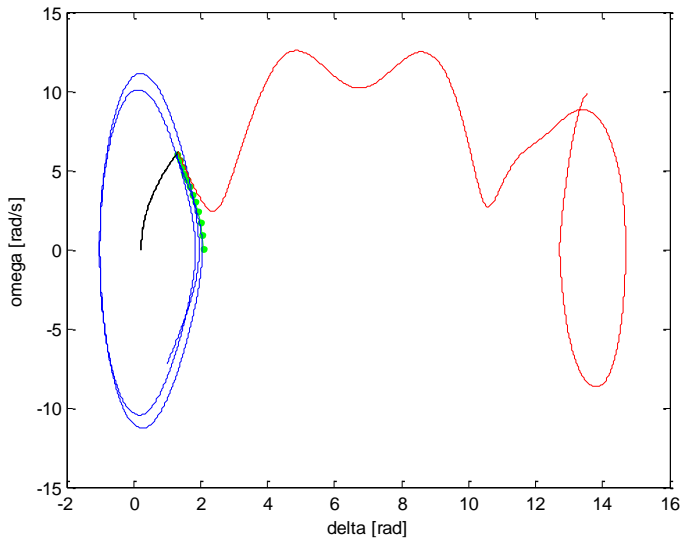
Gambar 4.12. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik D



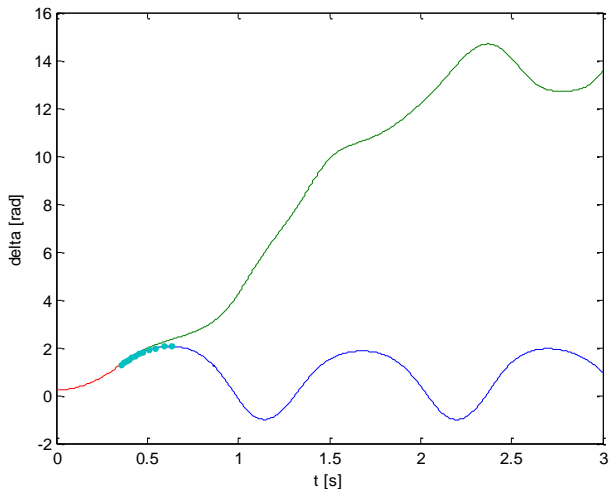
Gambar 4.13. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik D

e. Titik Gangguan E

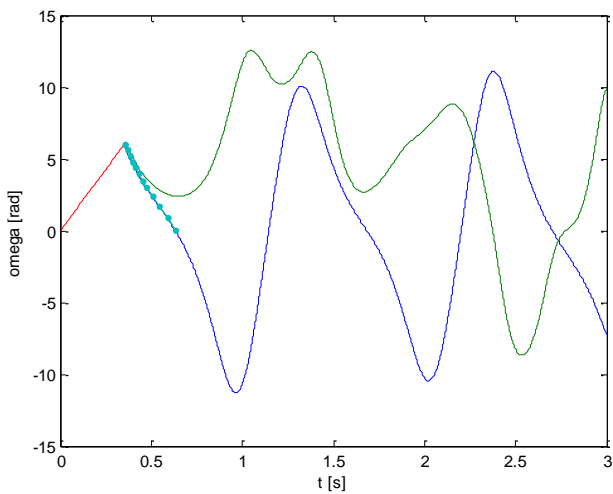
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3530 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,35 – 0,36) sec.



Gambar 4.14. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik E



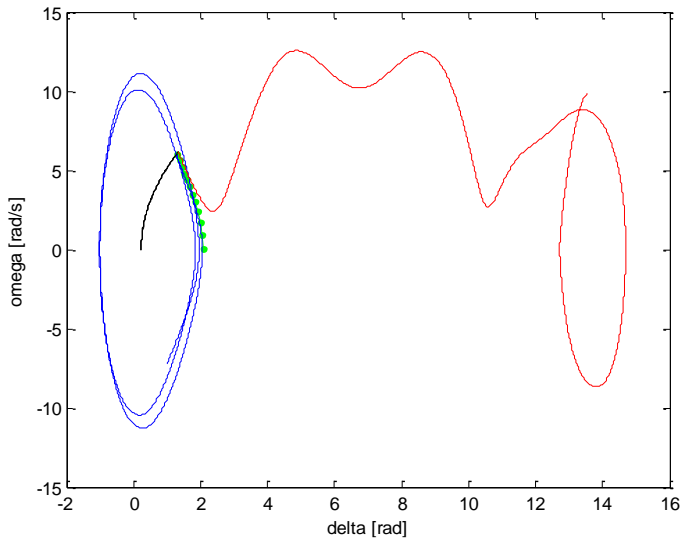
Gambar 4.15. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik E



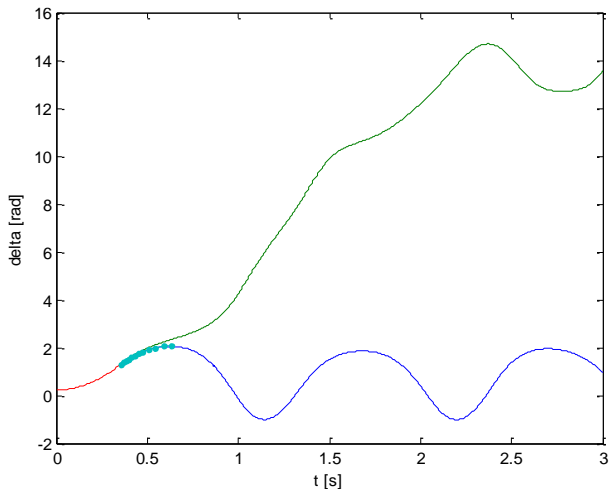
Gambar 4.16. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik E

f. Titik Gangguan F

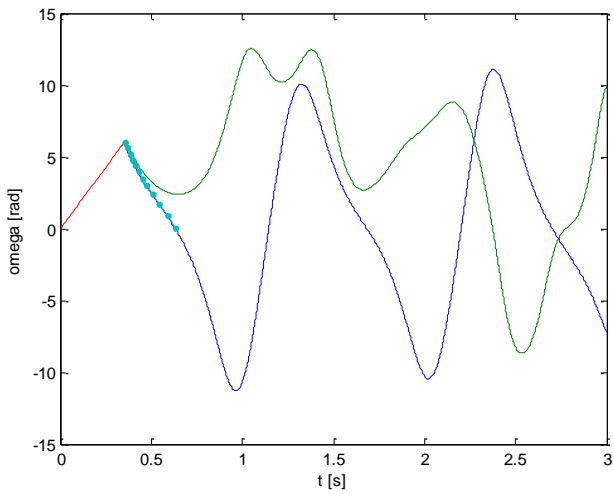
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3530 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,35 – 0,36) sec.



Gambar 4.17. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik F



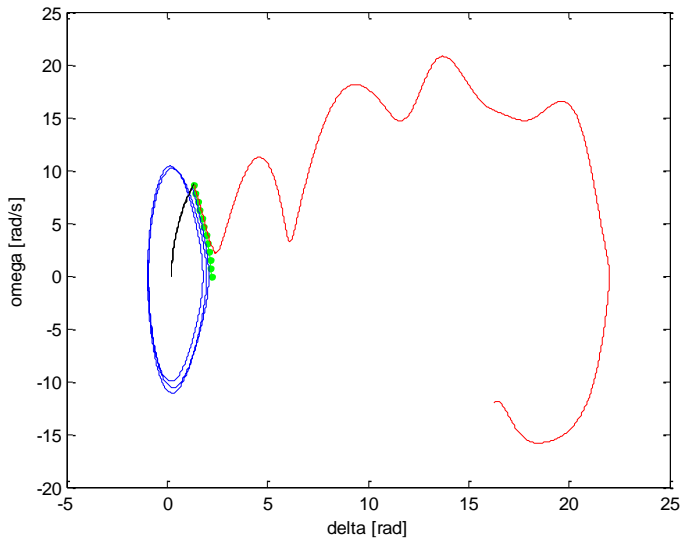
Gambar 4.18. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik F



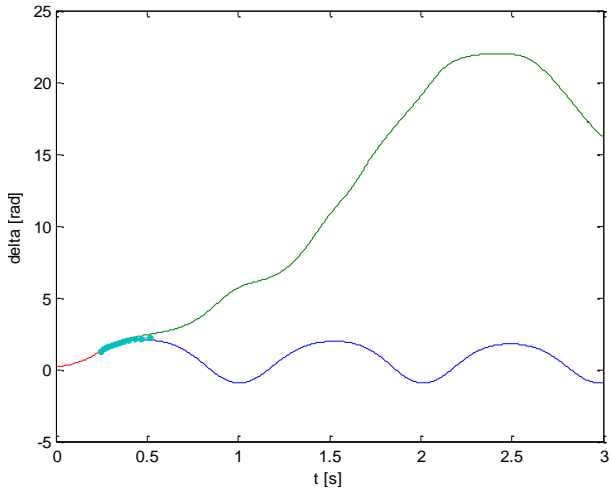
Gambar 4.19. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik F

g. Titik Gangguan G

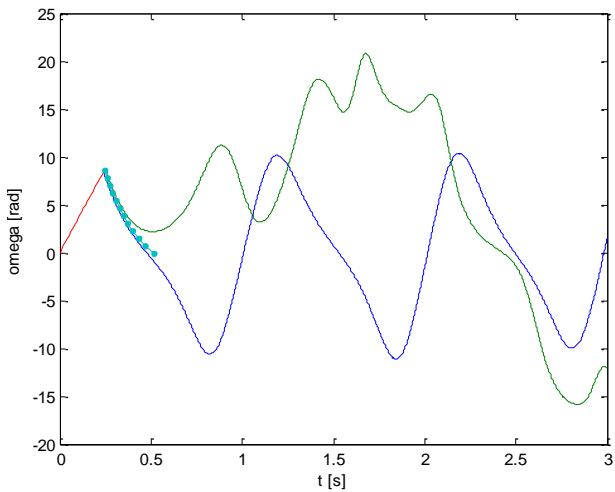
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2457 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,24 – 0,25) sec.



Gambar 4.20. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik G



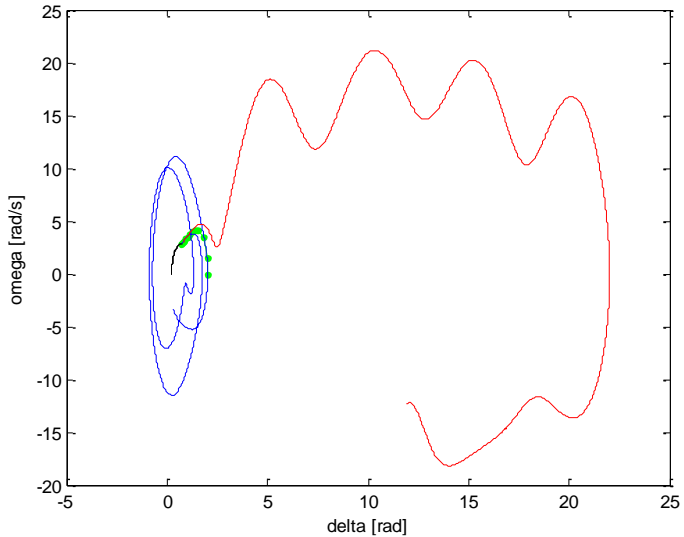
Gambar 4.21. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik G



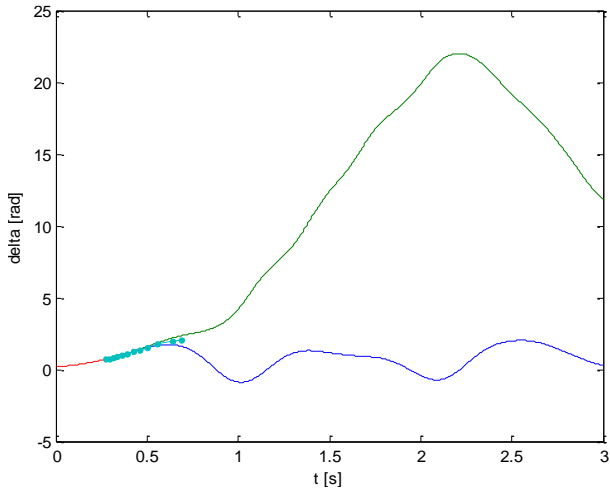
Gambar 4.22. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik G

h. Titik Gangguan H

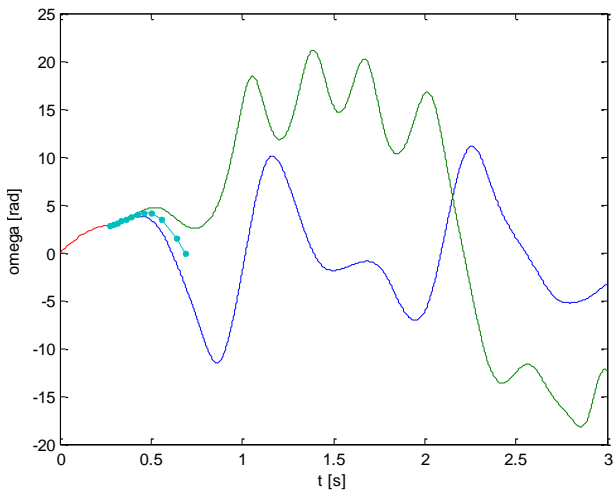
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2748 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,27 – 0,28) sec.



Gambar 4.23. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik H



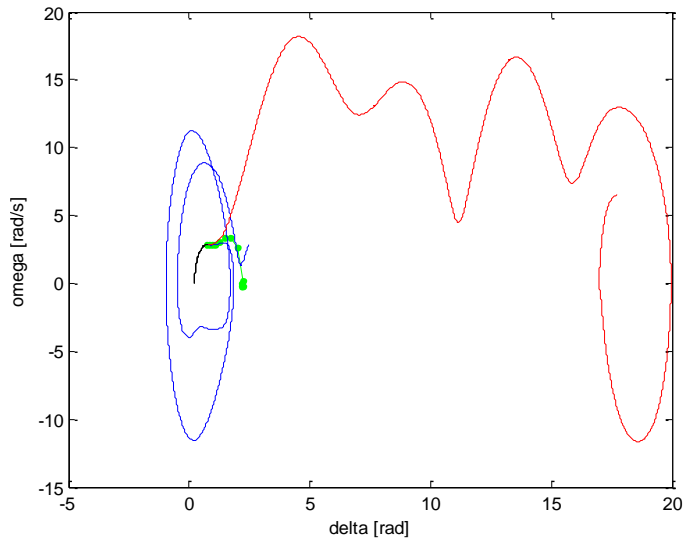
Gambar 4.24. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik H



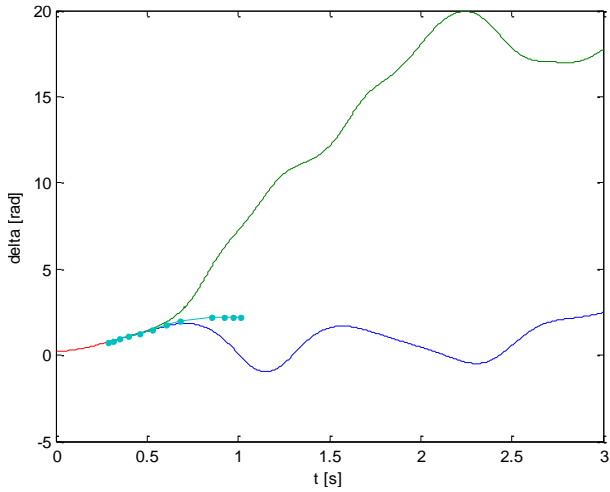
Gambar 4.25. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik H

i. Titik Gangguan I

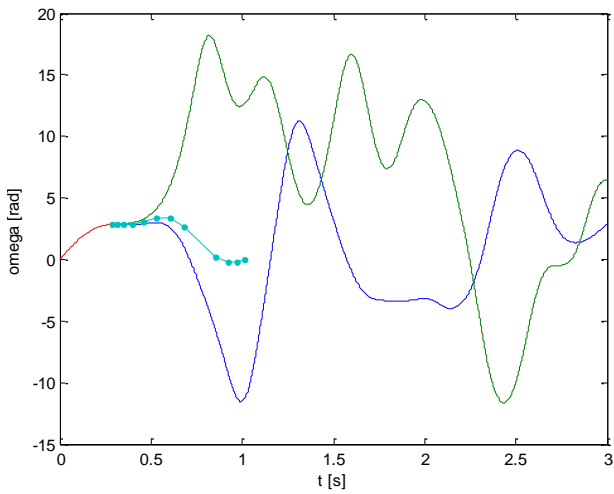
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2842 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,28 – 0,29) sec.



Gambar 4.26. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila sistem mengalami gangguan di titik I



Gambar 4.27. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik I



Gambar 4.28. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator tanpa *damping* bila gangguan terjadi di titik I

Dari Gambar 4.2 – Gambar 4.28 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dalam ketiga domain tersebut (ω terhadap waktu, δ terhadap waktu, dan ω terhadap δ). Apabila CB dari saluran yang mengalami gangguan diputus kurang dari CCT (masuk di daerah *stable trajectory*) maka sistem akan berosilasi menuju keadaan stabil kembali. Dan sebaliknya, apabila CB dari sistem yang mengalami gangguan diputus lebih dari CCT (masuk di daerah *unstable trajectory*) maka sistem menjadi tidak stabil dan bisa mengakibatkan *blackout*.

4.1.4 Perhitungan CCT pada sistem 3 generator 9 bus Fouad dan Anderson dengan *damping*

Pada sub-bab sebelumnya telah dilampirkan hasil perhitungan CCT pada sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson dengan mengabaikan *damping coefficient*. Selanjutnya pada sub-bab ini akan dilakukan simulasi dari sistem dengan mempertimbangkan *damping coefficient* dari setiap generator yang ada, sehingga dapat memodelkan keadaan sistem secara *real-time*.

Tabel 4.5 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 3 generator dengan mempertimbangkan *damping*

Fault Point	Open Line	Critical Trajectory		Time Domain Simulation (TDS)		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,3912	0,4963	0,39-0,40	111,31	0,0
B	2-7	0,2374	0,4054	0,23-0,24	112,45	0,0
C	3-9	0,2990	0,4223	0,29-0,30	112,58	0,0
D	4-5	0,3678	0,4000	0,36-0,37	112,64	0,0
E	4-6	0,3677	0,4891	0,36-0,37	112,78	0,0
F	5-7	0,2465	0,4196	0,24-0,25	112,58	0,0
G	7-8	0,2526	0,3922	0,25-0,26	112,77	0,0
H	6-9	0,2906	0,4437	0,29-0,30	112,68	0,0
I	8-9	0,2994	0,7119	0,29-0,30	112,79	0,0

Cara perhitungan yang dilakukan secara keseluruhan sama seperti perhitungan tanpa *damping coefficient*, hanya pada pemodelan sistemnya ditambahkan *damping coefficient* sesuai persamaan (2.28) dan persamaan (2.29). Serta pada peng-input-an data dari sistem juga

ditambahkan *damping coefficient* sebesar 1% untuk setiap generator. Berikut dilampirkan hasil simulasi perhitungan CCT pada sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson menggunakan metode *critical trajectory* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* yang dibandingkan dengan simulasi perhitungan CCT menggunakan metode konvensional.

Waktu simulasi (*CPU time*) tergantung dari kecepatan processor dan spesifikasi dari perangkat yang digunakan. Waktu simulasi dari metode konvensional TDS lebih lama 10 kali lipat daripada metode *critical trajectory* untuk mendapatkan nilai CCT-nya, dan didapatkan dengan cara *trial and error* untuk setiap titik gangguan. Bila diasumsikan untuk mendapatkan *range* waktu stabil dan tidak stabilnya membutuhkan 10 kali percobaan dimana di setiap percobaannya diasumsikan membutuhkan waktu 10 detik ditambah waktu *running* programnya, maka dapat dirumuskan waktu simulasi (*CPU time*) untuk mendapatkan *range* waktu antara stabil dan tidak stabilnya adalah:

$$CPU[s] = 10 \times (10 + \text{waktu running program})$$

Sedangkan waktu simulasi dari metode *critical trajectory* didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

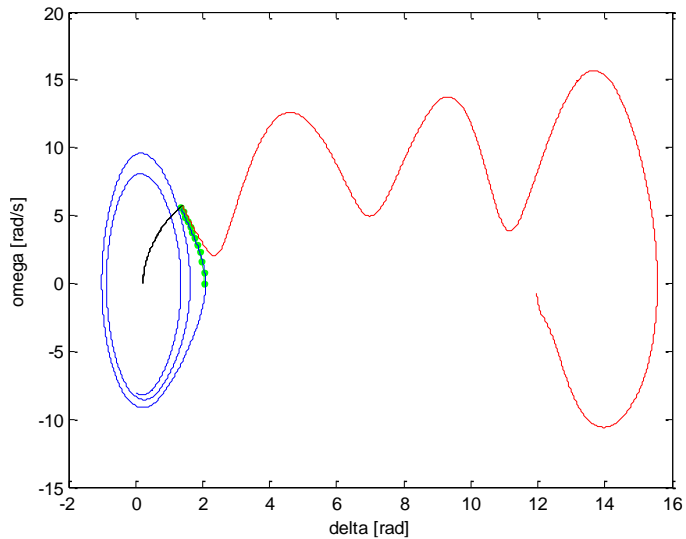
Pada Tabel 4.5, dapat diamati bahwa nilai *error* setiap titik adalah 0%. Hal ini menunjukkan bahwa setting nilai CCT pada CB aman untuk diterapkan pada sistem tersebut.

4.1.5 Analisis grafik pada sistem 3 generator 9 bus Fouad dan Anderson dengan *damping*

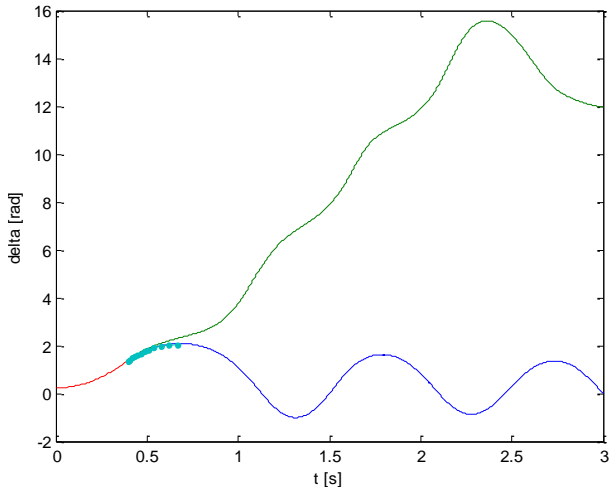
Pada Gambar 4.28 – Gambar 4.55 berikut dilampirkan grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson dengan mempertimbangkan *damping coefficient* pada perhitungannya. Grafik yang ditampilkan yaitu grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (*sec*), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (*sec*). Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang digunakan dan memiliki fungsi sama untuk *plotting* sama seperti pada kondisi tanpa *damping*. Berikut grafik hasil simulasi dari sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson dengan mempertimbangkan *damping coefficient*.

a. Titik Gangguan A

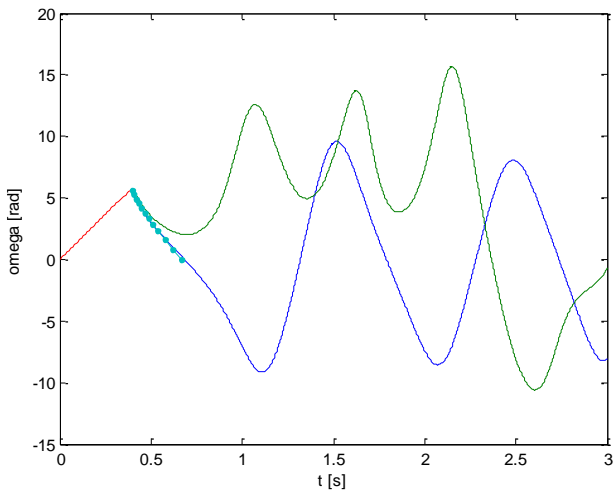
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3912 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,39 – 0,40) sec.



Gambar 4.29. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik A



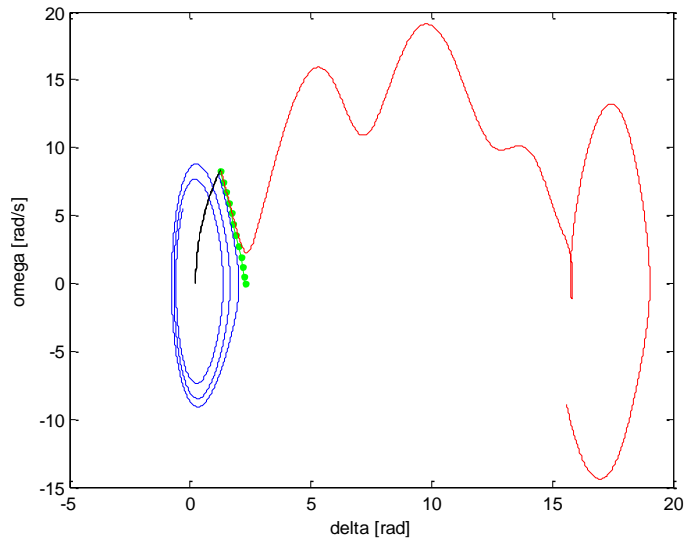
Gambar 4.30. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik A



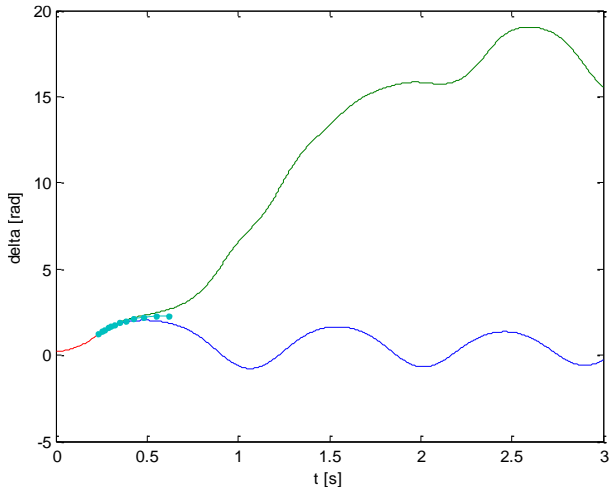
Gambar 4.31. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik A

b. Titik Gangguan B

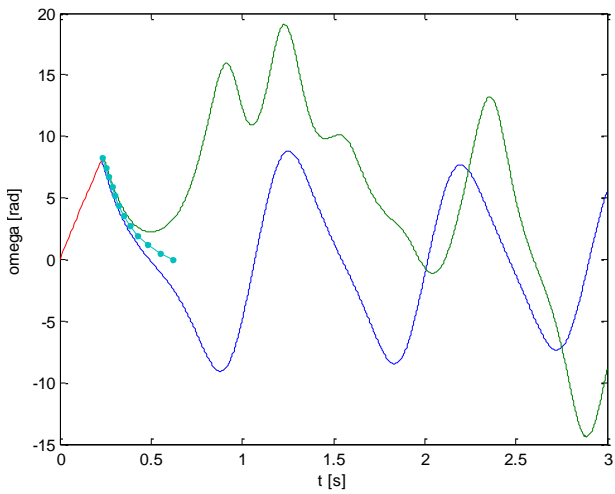
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah $0,2374 \text{ sec}$, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah *range* antara $(0,23 - 0,24) \text{ sec}$.



Gambar 4.32. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik B



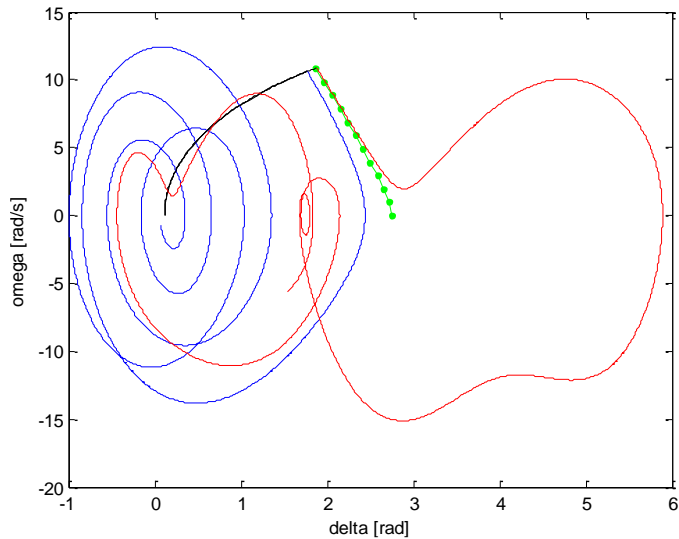
Gambar 4.33. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik B



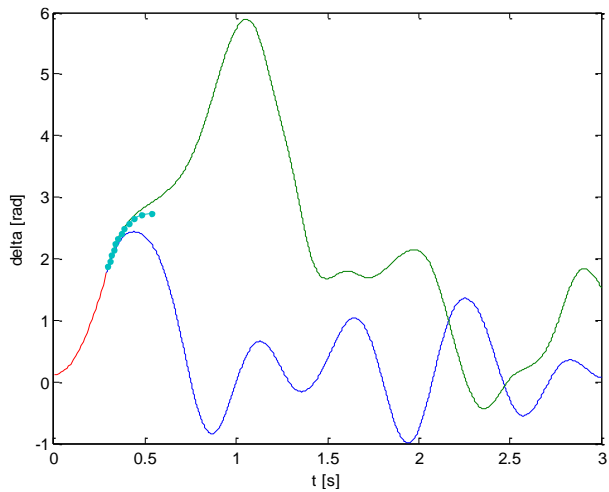
Gambar 4.34. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik B

c. Titik Gangguan C

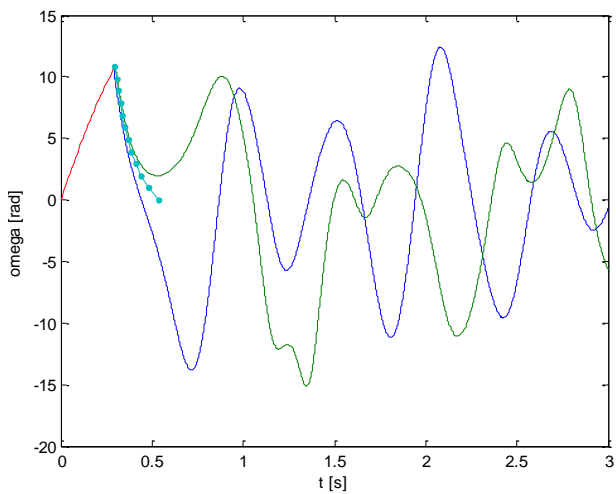
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2990 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,29 – 0,30) sec.



Gambar 4.35. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik C



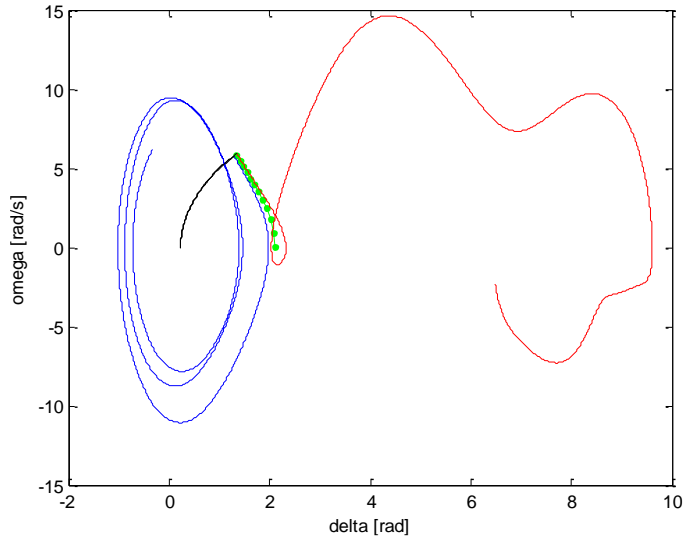
Gambar 4.36. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik C



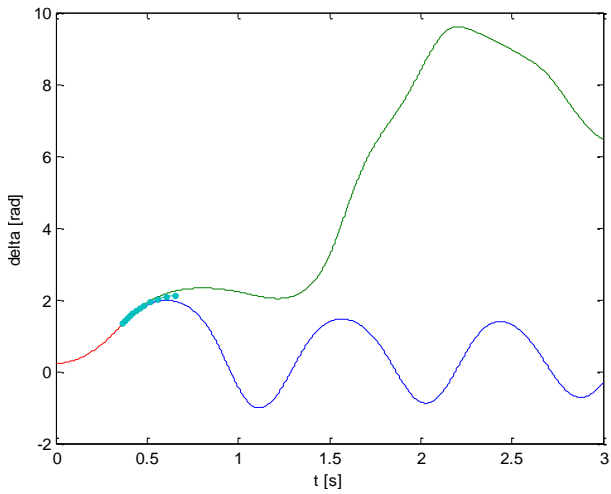
Gambar 4.37. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik C

d. Titik Gangguan D

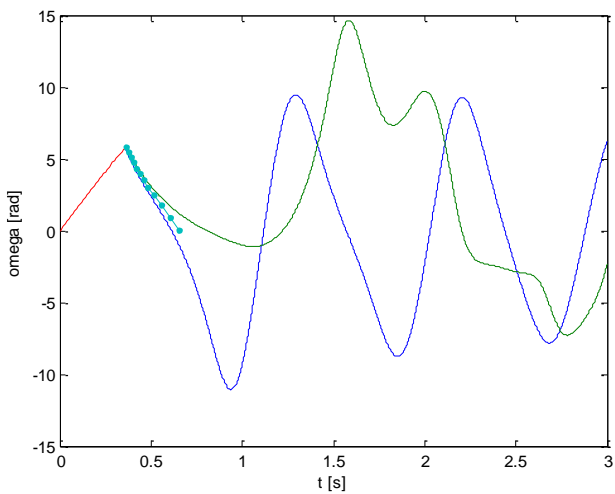
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3678 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,36 – 0,37) sec.



Gambar 4.38. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik D



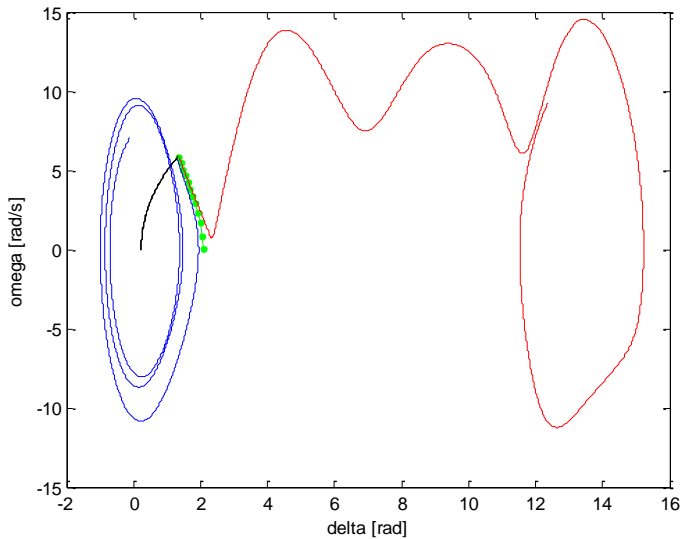
Gambar 4.39. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik D



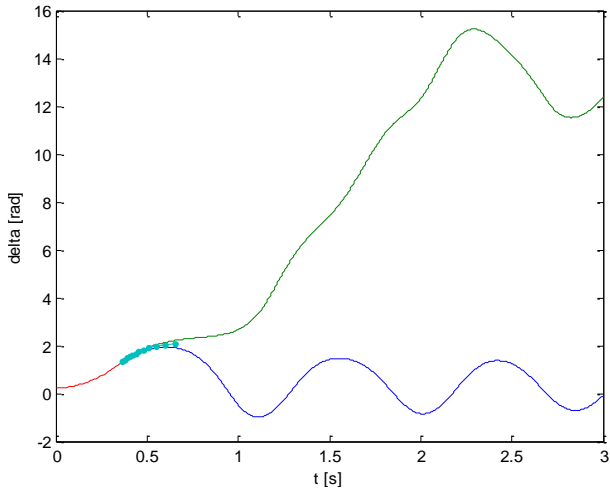
Gambar 4.40. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik D

e. Titik Gangguan E

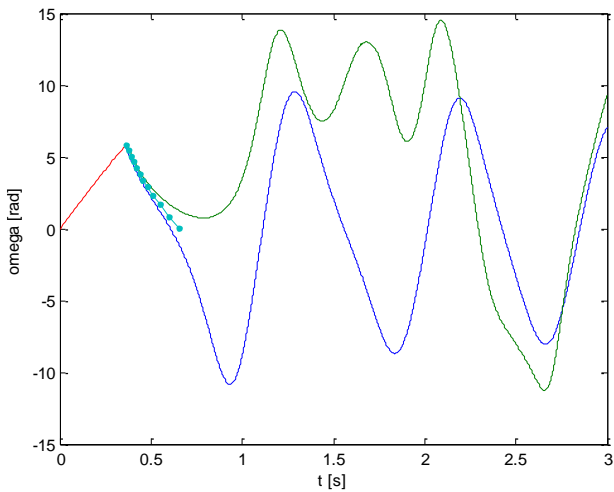
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah $0,3677 \text{ sec}$, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah *range* antara $(0,36 - 0,37) \text{ sec}$.



Gambar 4.41. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik E



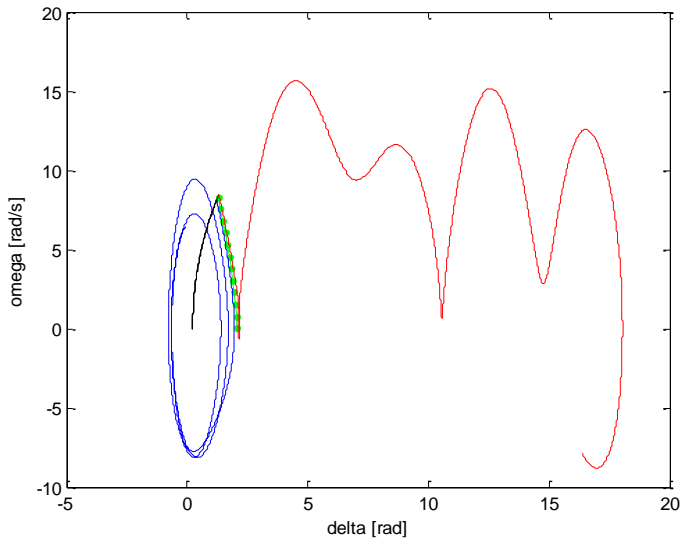
Gambar 4.42. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik E



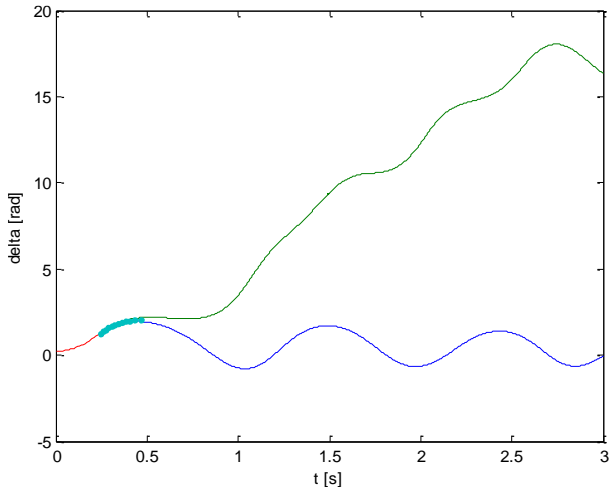
Gambar 4.43. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik E

f. Titik Gangguan F

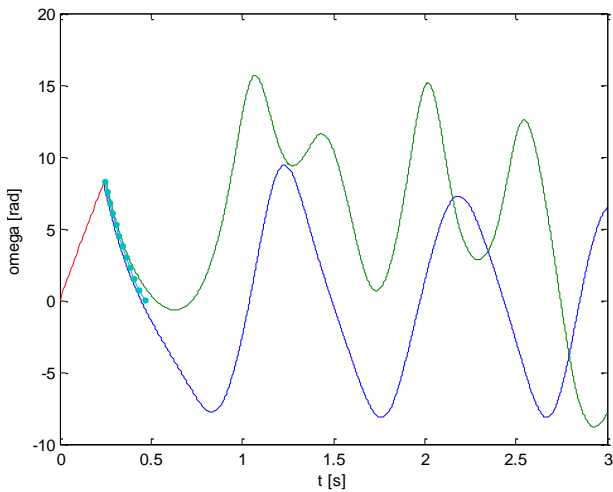
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2465 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,24 – 0,25) sec.



Gambar 4.44. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik F



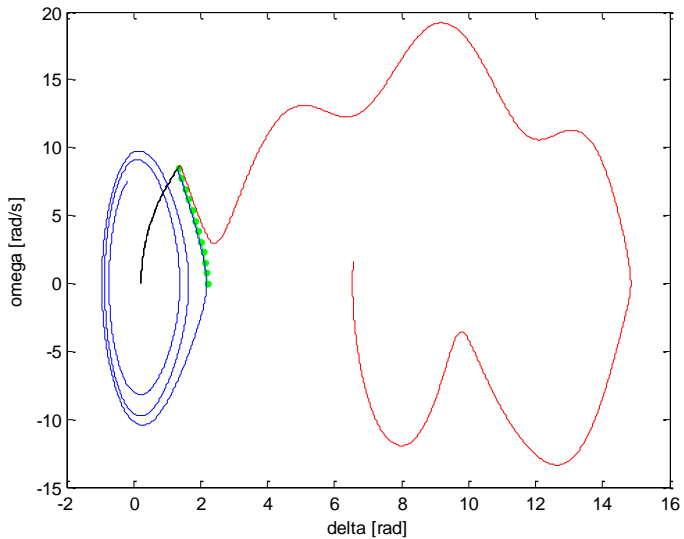
Gambar 4.45. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik F



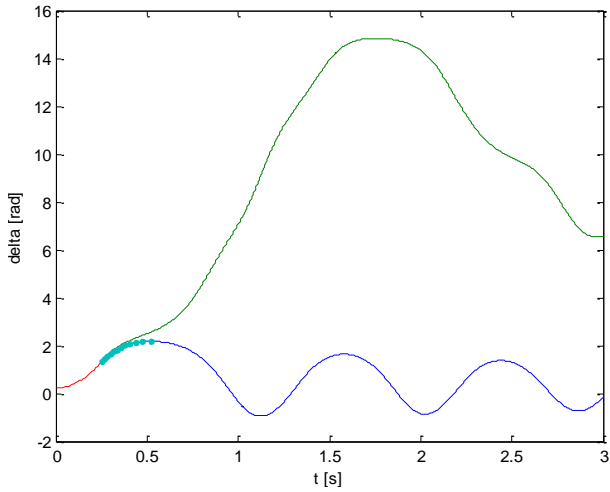
Gambar 4.46. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik F

g. Titik Gangguan G

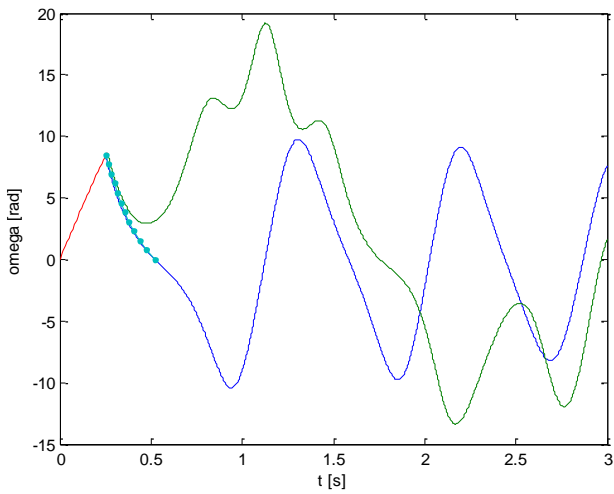
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2526 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,25 – 0,26) sec.



Gambar 4.47. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik G



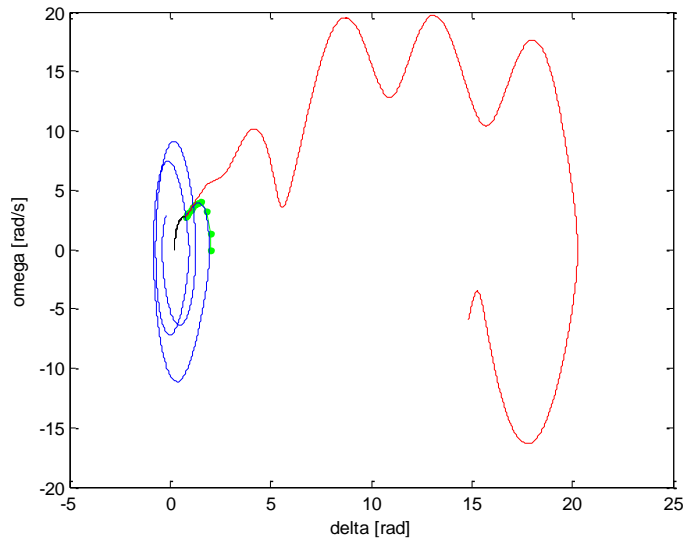
Gambar 4.48. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik G



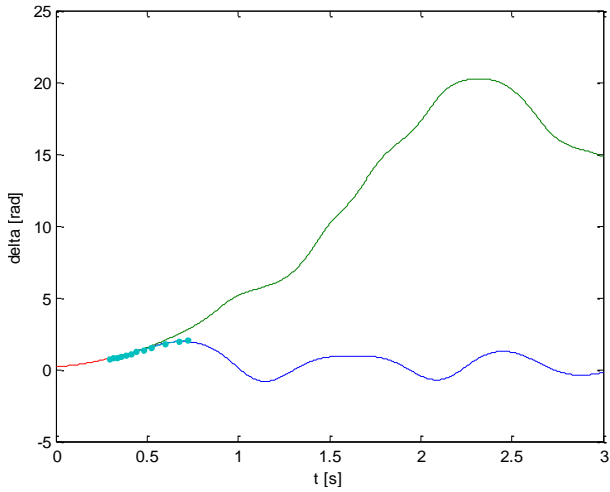
Gambar 4.49. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik G

h. Titik Gangguan H

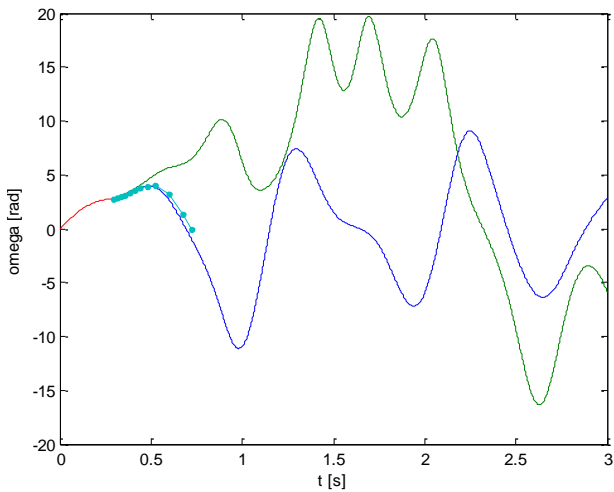
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2906 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,29 – 0,30) sec.



Gambar 4.50. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik H



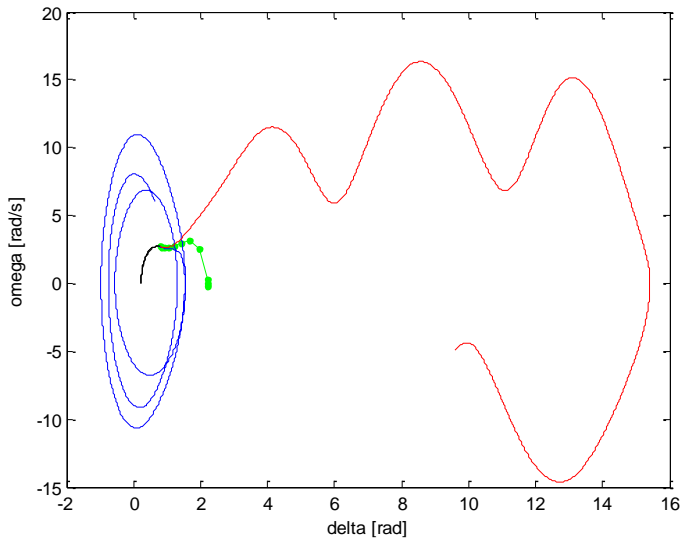
Gambar 4.51. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik H



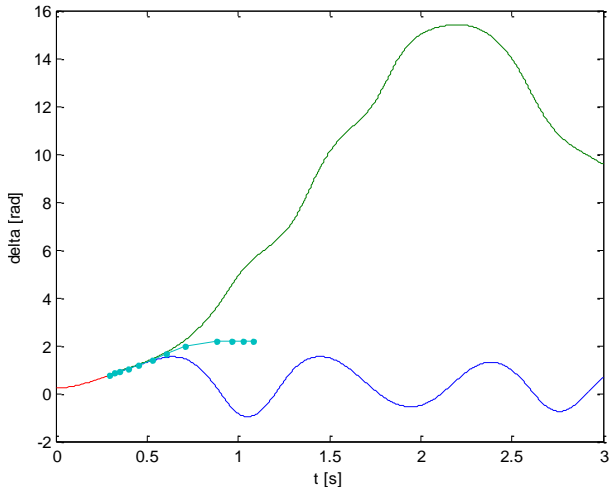
Gambar 4.52. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik H

i. Titik Gangguan I

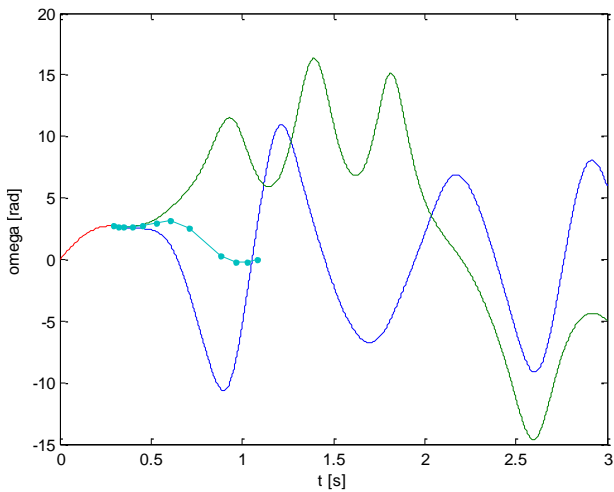
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2994 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,29 – 0,30) sec.



Gambar 4.53. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik I



Gambar 4.54. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik I



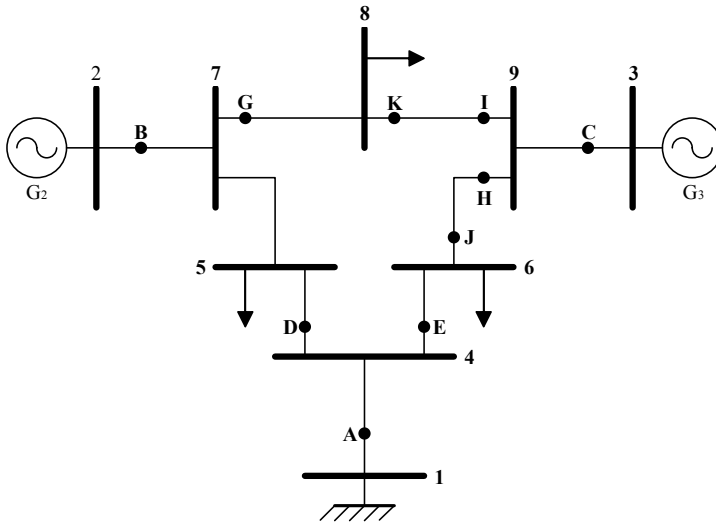
Gambar 4.55. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik I

Dari Gambar 4.29 – Gambar 4.55 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dalam ketiga domain, yaitu domain ω terhadap waktu, δ terhadap waktu, dan ω terhadap δ . Apabila CB dari saluran yang mengalami gangguan diputus kurang dari CCT (masuk di daerah *stable trajectory*), maka sistem akan berosilasi menuju keadaan stabil kembali. Dan sebaliknya, apabila CB dari sistem yang mengalami gangguan diputus lebih dari CCT (masuk di daerah *unstable trajectory*), maka sistem menjadi tidak stabil dan bisa mengakibatkan *blackout*.

Dan dari pemodelan sistem saat mengabaikan *damping coefficient* serta saat mempertimbangkan *damping coefficient* dapat dibandingkan dan disimpulkan bahwa perhitungan menjadi sedikit lebih lama ($< 0,1 \text{ sec}$) pada saat sistem dimodelkan dengan mempertimbangkan *damping coefficient*. Perhitungan menjadi lebih lama karena sistem yang dimodelkan saat memperimbangkan *damping coefficient* menjadi lebih kompleks dan lebih mendekati ke keadaan nyata.

4.2 CCT pada Sistem 2-generator 9-Bus Fouad dan Anderson dengan Mempertimbangkan Kontroler terhubung dengan *Infinite Bus*

Metode *critical trajectory* selanjutnya akan diterapkan pada sistem Fouad dan Anderson 3 generator 9 bus yang dimodifikasi untuk dihubungkan dengan *infinite bus*. Generator 1 dijadikan sebagai referensi untuk menjadi *infinite bus*, sehingga di sistem ini diasumsikan hanya memiliki 2 generator milik sendiri yang beroperasi. Metode ini diawali dengan menjalankan program BCU-Shadowing untuk didapatkan nilai CUEP dan indeks energi potensial dari setiap generator yang ada. Generator yang memiliki indeks energi terbesar dijadikan sebagai generator kritis dan nilainya dimasukkan di *weighting matrix* dalam perumusan matriks Jacobian. Berikut *single line diagram* sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson yang terhubung dengan *infinite bus*:



Gambar 4.56 Sistem 2-generator 9-bus Fouad dan Anderson terhubung *infinite bus*

Dari Gambar 4.56 telah ditentukan letak gangguan terjadi, yaitu di masing-masing titik pada saluran transmisi dengan kode A-I. Gangguan diasumsikan terjadi di 9 titik saluran transmisi tersebut, dengan asumsi:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 4, dekat bus 1
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7, dekat bus 2
- C : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9, dekat bus 3
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- E : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6, dekat bus 4
- G : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 9
- I : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9, dekat bus 9
- J : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 6
- K : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9, dekat bus 8

Sedangkan untuk spesifikasi data dari saluran transmisi sistem dan spesifikasi data dari bus sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson terhubung *infinite bus* dilampirkan secara berturut-turut pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7.

4.2.1 Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT

Terdapat beberapa parameter yang harus diinputkan terlebih dahulu sebelum dapat dilakukan perhitungan CCT. Parameter-parameter tersebut didapatkan setelah dilakukan perhitungan analisa aliran daya. Be-

Tabel 4.6 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson

No.	Bus asal	Bus dituju	R	X	Half Line Charging Susceptance (p.u)
1	1	4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6	9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7	8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.7 Spesifikasi data bus sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	163,00	0,00	0,00	0,00
3	85,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	125,00	50,00
6	0,00	0,00	90,00	30,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	100,00	35,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00

rikut dilampirkan parameter yang didapatkan dari sistem, untuk di-inputkan pada perhitungan selanjutnya. Parameter tersebut antara lain :

1. Daya mekanis generator (P_m)
2. Tegangan bus generator (V)
3. Daya total generator (S)
4. Tegangan generator (E_a)

Tabel 4.8 Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa *power flow*

Generator di Bus	$P_m (p.u)$	$V (p.u)$	$S (p.u)$	$E_a (p.u)$
1	0,7164	1,0400	0,7164+j0,2705	1,0400
2	1,6300	0,3821	1,6300+j0,3700	1,1145
3	0,8500	0,6667	0,8500+j0,0181	1,0528

Setelah didapatkan parameter-parameter sesuai pada Tabel 4.8, dapat dikerjakan perhitungan untuk menentukan nilai CCT pada masing-masing titik gangguan.

4.2.2 Perhitungan CCT pada sistem 2 generator 9 bus Fouad dan Anderson terhubung *infinite bus* tanpa *damping*

Untuk membuktikan keefektifan dari metode yang diajukan, pada kali ini metode coba diterapkan pada sistem 3 generator 9 bus dari Fouad Anderson yang dimodifikasi untuk dihubungkan dengan *infinite bus* sesuai Gambar 4.56. Pada desain *single line diagram* tersebut, diasumsikan setiap saluran transmisi adalah *double circuit*/saluran ganda, dan gangguan 3 fasa terjadi di bus yang lebih dekat dengan titik gangguan pada salah satu saluran transmisinya. Dan beberapa saat kemudian, gangguan dapat dihilangkan dengan membuka CB di kedua ujung saluran transmisinya, sesuai penjelasan pada sub-bab 3.3.

Secara keseluruhan, perhitungan CCT yang dilakukan saat sistem terhubung *infinite bus* dan tidak terhubung *infinite bus* adalah sama. Yang membedakan adalah saat pemodelan sistem saat menggunakan metode Runge-Kutta orde ke-4 setelah dilakukan reduksi matriks jaringan. Setelah sistem dapat dimodelkan, diasumsikan gangguan terjadi, dan *fault-on trajectory* dapat ditemukan pula dengan metode TDS, yang disimpan sebagai $x^0(\tau)$ sebagai fungsi waktu, dan τ pada memori computer yang melakukan *running*. Lalu, $x^0(\tau)$ dengan nilai τ tertentu dipilih sebagai kondisi awal untuk menyimulasikan kondisi dinamis sekaligus pengevaluasi stabilitas dari sistem. Proses tersebut dilakukan secara terus menerus dengan mengganti-ganti nilai dari τ . Metode pencarian biner pangkat tiga dari *spline* digunakan untuk menentukan nilai kritis dari τ , yaitu CCT.

Simulasi yang akan dilakukan berikut mengabaikan koefisien *damping* yang terdapat pada setiap generator. Lalu metode *critical trajectory* akan dibandingkan pula dengan metode konvensional TDS

untuk dianalisa error serta beberapa aspek lainnya. Nilai CCT hasil perbandingan kedua metode tersebut dilampirkan pada Tabel 4.9 berikut. Hasil perhitungan pada tabel tersebut menyatakan bahwa nilai CCT berbeda di setiap titik gangguannya. Misalkan, pada gangguan B, CCT dari metode TDS adalah 0,20-0,21. Hal itu berarti sistem stabil sampai detik 0,20 dan sudah tidak stabil saat detik 0,21. Maka dapat diamati bahwa nilai CCT dari *critical trajectory* akan berada diantara *range* waktu dari hasil simulasi TDS tersebut.

Tabel 4.9 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping*

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	-	-	-	-	0,0
B	2-7	0,2056	0,3826	0,20-0,21	111,33	0,0
C	3-9	-	-	-	-	0,0
D	4-5	-	-	-	-	0,0
E	4-6	-	-	-	-	0,0
G	7-8	0,2216	0,3760	0,22-0,23	111,09	0,0
H	6-9	0,2587	0,4913	0,25-0,26	111,02	0,0
I	8-9	0,2631	1,1213	0,26-0,27	111,15	0,0
J	6-9	0,5250	0,3842	0,52-0,53	110,77	0,0
K	8-9	0,3205	0,5677	0,32-0,33	111,03	0,0

Waktu simulasi (*CPU time*) tergantung dari kecepatan processor dan spesifikasi dari perangkat yang digunakan. Waktu simulasi dari metode konvensional TDS lebih lama 10 kali lipat daripada metode *critical trajectory* untuk mendapatkan nilai CCT-nya, dan didapatkan dengan cara *trial and error* untuk setiap titik gangguan. Bila diasumsikan untuk mendapatkan *range* waktu stabil dan tidak stabilnya membutuhkan 10 kali percobaan dimana di setiap percobaannya diasumsikan membutuhkan waktu 10 detik ditambah waktu *running* programnya, maka dapat dirumuskan waktu simulasi (*CPU time*) untuk mendapatkan *range* waktu antara stabil dan tidak stabilnya adalah:

$$CPU[s] = 10 \times (10 + \text{waktu running program})$$

Sedangkan waktu simulasi dari metode *critical trajectory* didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Nilai *error* didapatkan dari selisih nilai CCT hasil perhitungan metode *critical trajectory* dan batas bawah *range* stabil (*rs*) atau batas atas *range* tidak stabil (*ru*) hasil perhitungan metode TDS. Apabila nilai CCT berada lebih dari *range* tidak stabil maka menggunakan *ru*, sedangkan apabila nilai CCT berada kurang dari *range* stabil maka menggunakan *rs*. Sehingga *error* bisa bernilai positif atau negatif. Berikut perumusan untuk mencari nilai *error*-nya saat bernilai positif:

$$error(+) = \frac{CCT - ru}{ru}$$

Dan berikut perumusan untuk mencari nilai *error*-nya saat bernilai negatif:

$$error(-) = \frac{CCT - rs}{rs}$$

Sesuai Tabel 4.9, dapat diamati bahwa nilai *error* jika gangguan terjadi pada titik B,G,H,I,J,K adalah 0%. Sedangkan nilai CCT kedua metode jika gangguan terjadi pada titik gangguan A,C,D,E tidak didapatkan. Hal ini terjadi karena apabila gangguan terjadi di keempat titik tersebut maka sistem akan selalu stabil.

4.2.3 Analisis grafik pada sistem 2 generator 9 bus Fouad dan Anderson terhubung *infinite bus* tanpa *damping*

Pada sub-bab ini akan dilampirkan grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson yang terhubung *infinite bus* tanpa mempertimbangkan koefisien *damping* pada perhitungannya. Grafik tersebut merupakan hasil *plotting* saat dilakukan perhitungan nilai CCT-nya. Grafik yang ditampilkan dibatasi 3 karakteristik grafik, yaitu grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (*sec*), dan grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (*sec*). Sementara grafik daya mekanis (P_m) terhadap waktu (*sec*) dan grafik tegangan internal generator (E_a) terhadap waktu (*sec*) tidak ditampilkan karena terlalu sulit untuk dibedakan kondisi stabil dan kondisi tidak stabilnya. Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang

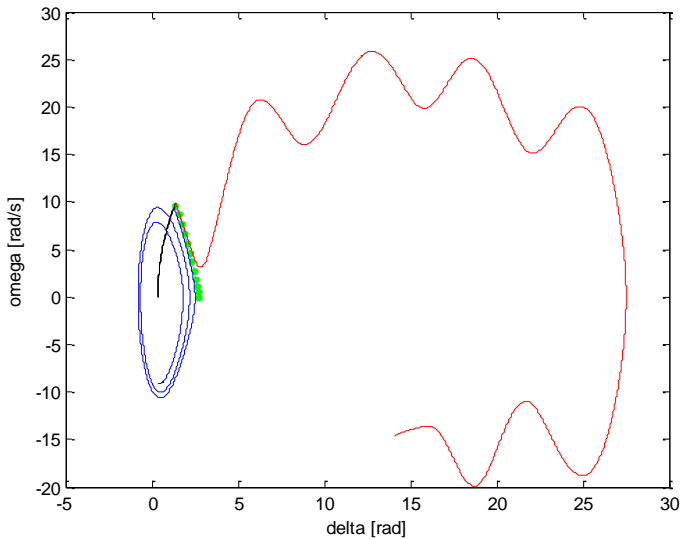
digunakan untuk *plotting*. Warna pada ketiga kurva tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Merah : kurva kondisi tidak stabil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode konvensional TDS
- b. Biru : kurva kondisi stabil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode konvensional TDS
- c. Hijau : kurva yang didapatkan dari perhitungan menggunakan metode *critical trajectory*, yang mengartikan bahwa sistem harus diputus saat atau sebelum kurva hijau tercapai

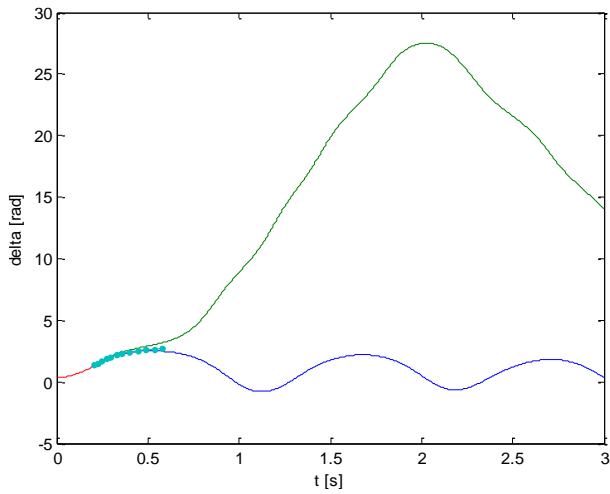
Berikut dilampirkan grafik hasil simulasi dengan menggunakan metode *critical trajectory* pada setiap titik gangguan sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson terhubung *infinite bus*.

a. Titik Gangguan B

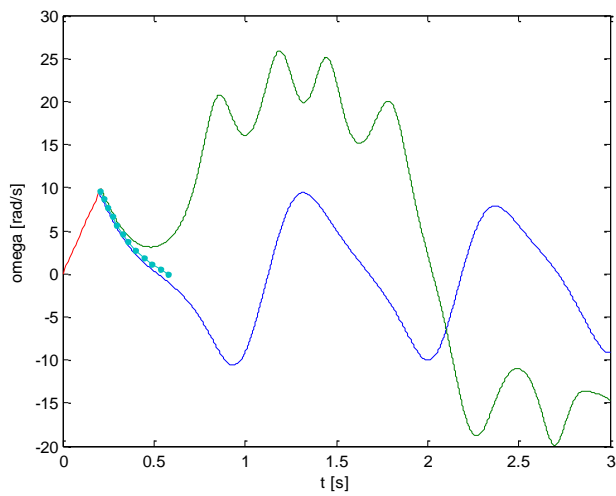
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2056 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,20 – 0,21) sec.



Gambar 4.57. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* bila mengalami gangguan di titik B



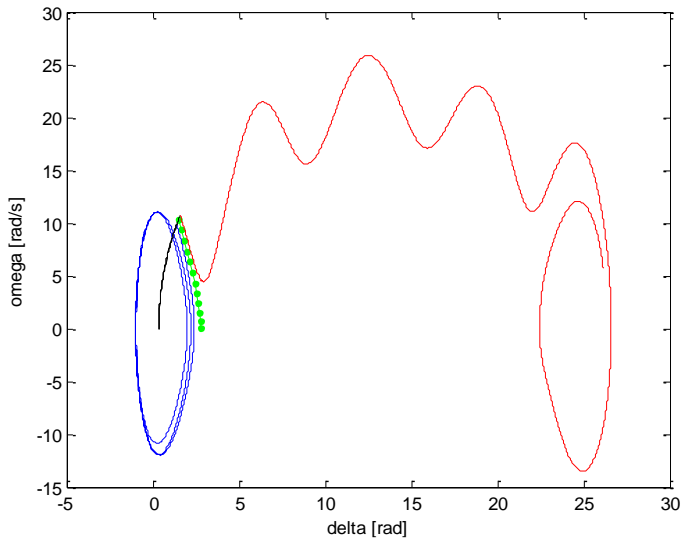
Gambar 4.58. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di titik B



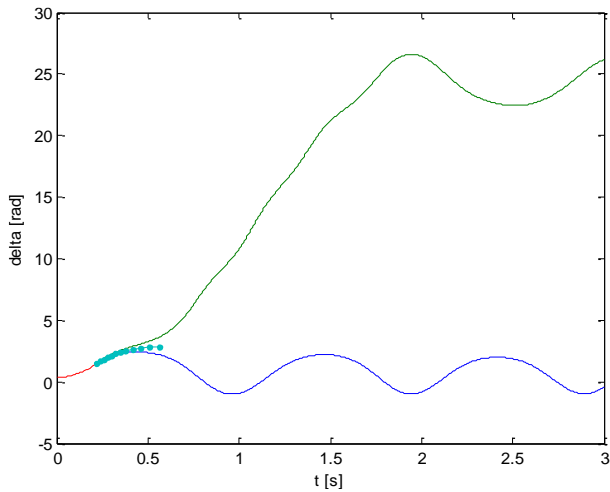
Gambar 4.59. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di B

b. Titik Gangguan G

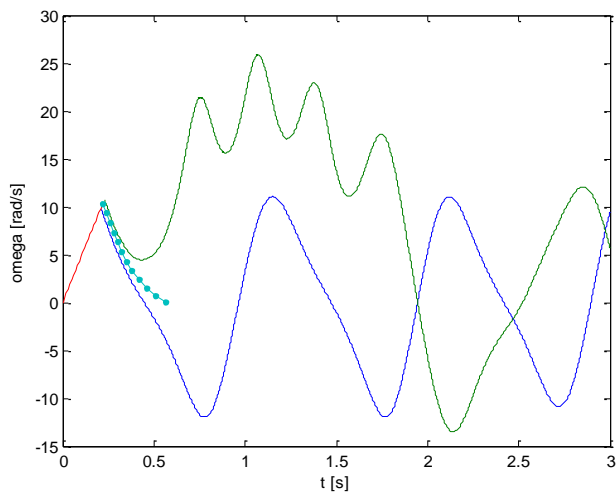
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2216 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,22 – 0,23) sec.



Gambar 4.60. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* bila mengalami gangguan di titik G



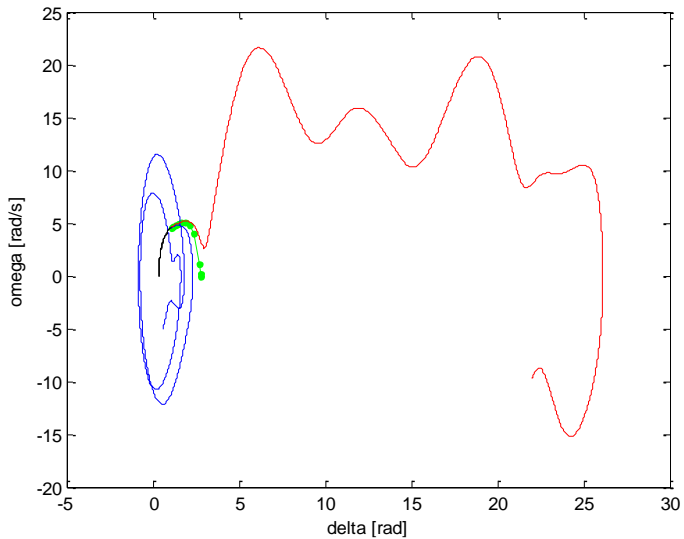
Gambar 4.61. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di titik G



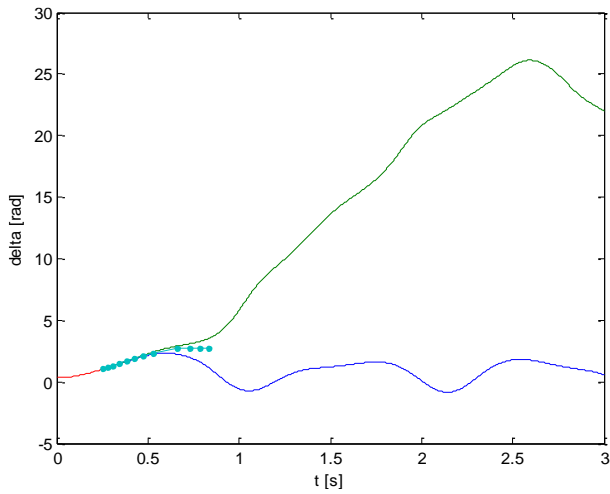
Gambar 4.62. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di G

c. Titik Gangguan H

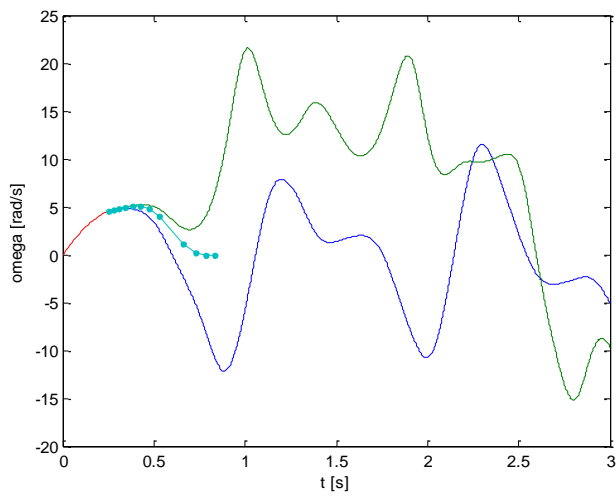
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2587 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,25 – 0,26) sec.



Gambar 4.63. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* bila mengalami gangguan di titik H



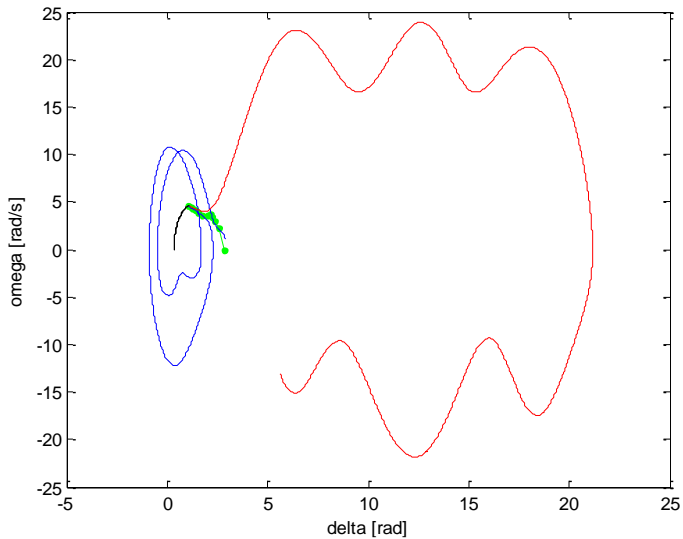
Gambar 4.64. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di titik H



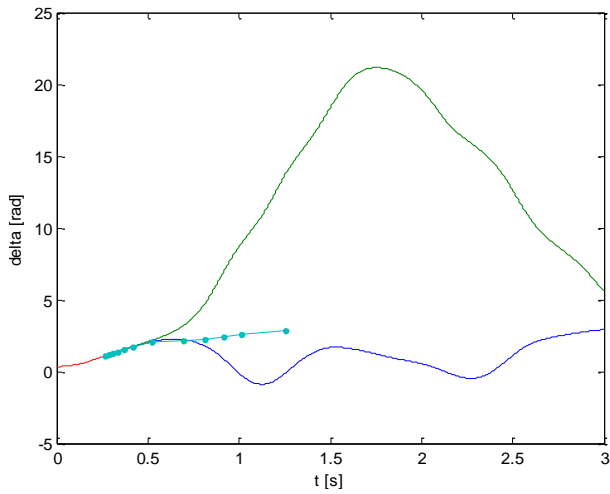
Gambar 4.65. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di H

d. Titik Gangguan I

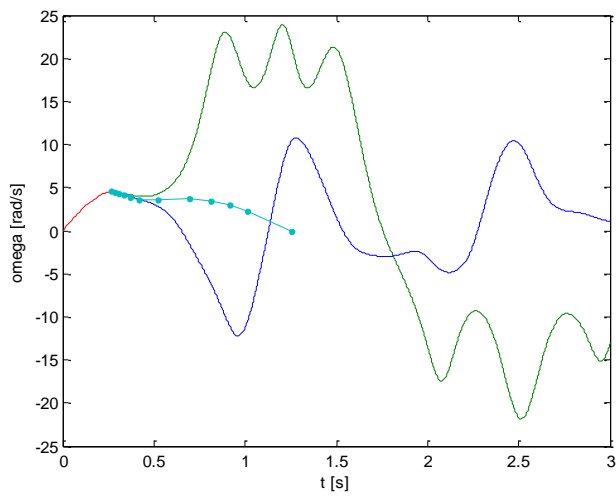
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2631 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,26 – 0,27) sec.



Gambar 4.66. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* bila mengalami gangguan di titik I



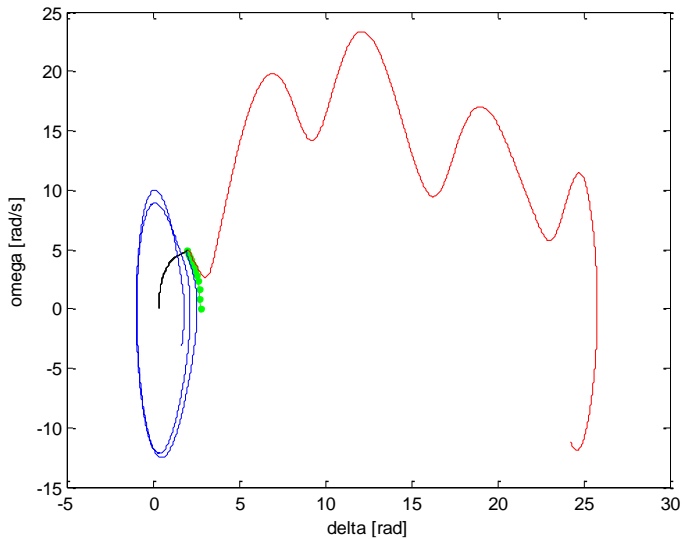
Gambar 4.67. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di titik I



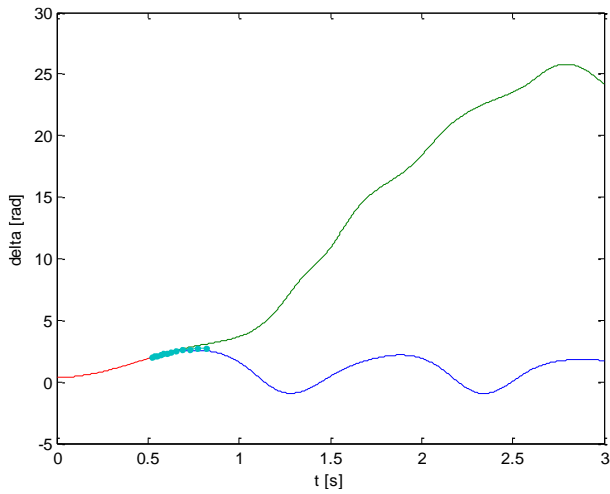
Gambar 4.68. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di I

e. Titik Gangguan J

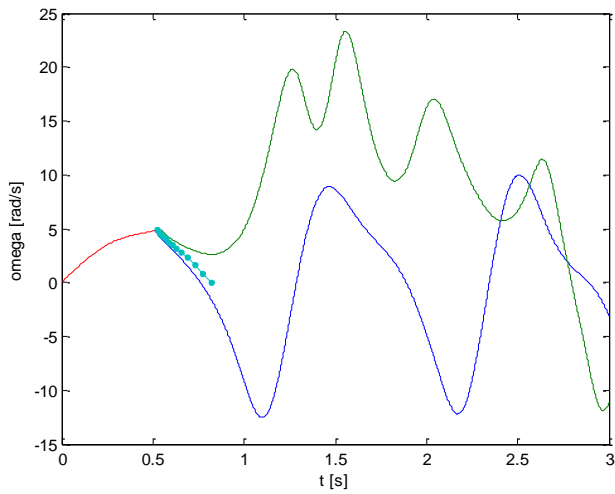
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,5250 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,52 – 0,53) sec.



Gambar 4.69. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* bila mengalami gangguan di titik J



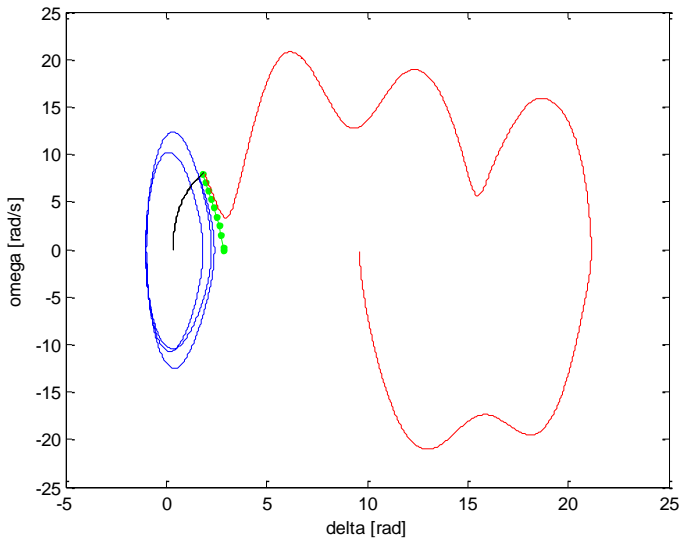
Gambar 4.70. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di titik J



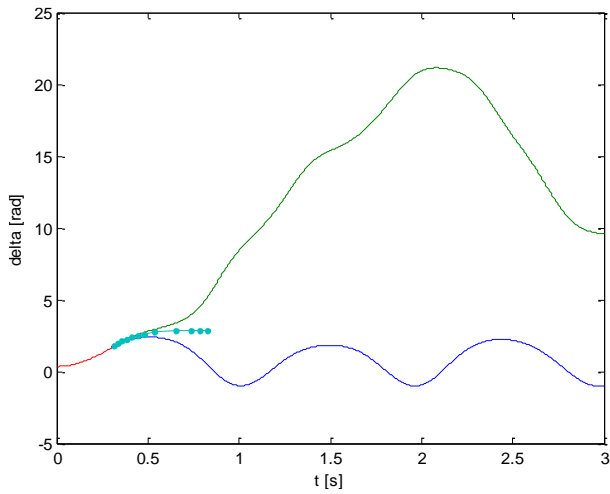
Gambar 4.71. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di J

f. Titik Gangguan K

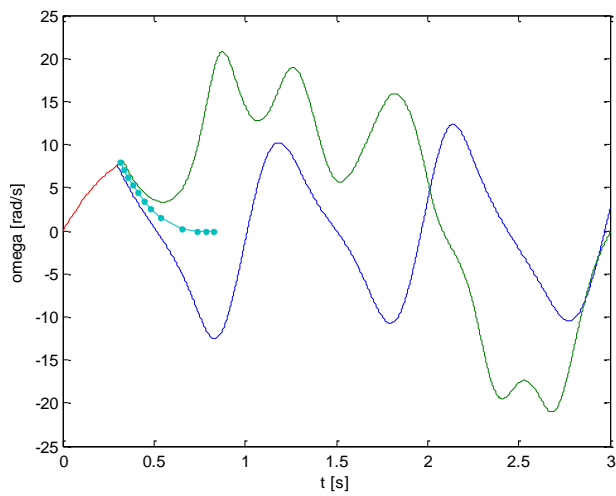
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3205 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,32 – 0,33) sec.



Gambar 4.72. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* bila mengalami gangguan di titik K



Gambar 4.73. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di titik K



Gambar 4.74. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* tanpa *damping* saat gangguan di K

Gambar 4.57 – Gambar 4.74 membuktikan perhitungan CCT pada Tabel 4.9, dimana saat gangguan terjadi di titik B,G,H,I,J,K, metode *critical trajectory* tidak memiliki *error* perhitungan saat dibandingkan dengan metode konvensional TDS. Tapi apabila terjadi gangguan di titik A,C,D,E nilai CCT tidak dapat ditemukan menggunakan kedua metode yang digunakan. Pada kasus khusus di 4 titik gangguan ini, metode konvensional TDS maupun metode *critical trajectory* tidak dapat menyelesaikan perhitungannya, karena pada kasus ini sistem akan selalu kembali ke keadaan stabil.

4.2.4 Perhitungan CCT pada sistem 2 generator 9 bus Fouad dan Anderson terhubung *infinite bus* dengan *damping*

Pada sub-bab sebelumnya telah dilampirkan hasil perhitungan CCT pada sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson terhubung *infinite bus* dengan mengabaikan *damping coefficient*. Selanjutnya pada sub-bab ini akan dilakukan perhitungan CCT dari sistem dengan mempertimbangkan *damping coefficient* dari setiap generator yang ada, sehingga dapat memodelkan keadaan sistem secara *real-time*.

Tabel 4.10 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping*

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	-	-	-	-	0,0
B	2-7	0,2128	0,3909	0,21-0,22	111,39	0,0
C	3-9	-	-	-	-	0,0
D	4-5	-	-	-	-	0,0
E	4-6	-	-	-	-	0,0
G	7-8	0,2289	0,3804	0,22-0,23	111,24	0,0
H	6-9	0,2746	0,5595	0,27-0,28	111,59	0,0
I	8-9	0,2910	1,1260	0,29-0,30	111,35	0,0
J	6-9	0,5827	0,3841	0,58-0,59	111,05	0,0
K	8-9	0,3355	0,6287	0,33-0,34	111,36	0,0

Cara perhitungan yang dilakukan secara keseluruhan sama seperti perhitungan tanpa *damping coefficient*, hanya pada pemodelan sistemnya ditambahkan *damping coefficient* sesuai persamaan (2.28) dan persamaan (2.29). Sehingga pada peng-input-an data dari sistem perlu untuk ditambahkan *damping coefficient* sebesar 1% untuk setiap generator. Berikut dilampirkan hasil simulasi perhitungan CCT pada sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson terhubung *infinite bus* menggunakan metode *critical trajectory* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* yang dibandingkan dengan simulasi perhitungan CCT menggunakan metode konvensional.

Sesuai Tabel 4.10, dapat diamati bahwa nilai *error* jika gangguan terjadi pada titik B,G,H,I,J,K adalah 0%. Sedangkan nilai CCT kedua metode jika gangguan terjadi pada titik gangguan A,C,D,E tidak didapatkan. Hal ini terjadi karena apabila gangguan terjadi di keempat titik tersebut maka sistem akan selalu kembali ke keadaan stabil.

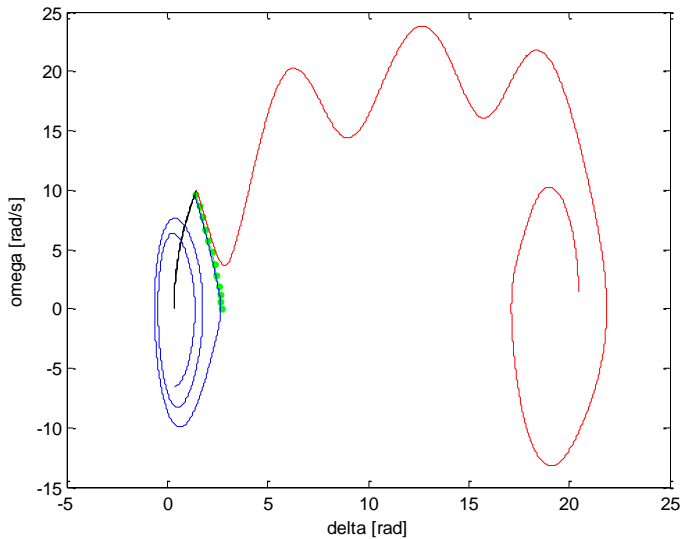
4.2.5 Analisis grafik pada sistem 2 generator 9 bus Fouad dan Anderson terhubung *infinite bus* dengan *damping*

Pada sub-bab ini akan dilampirkan grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson yang terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan koefisien *damping* pada perhitungannya. Grafik tersebut merupakan hasil *plotting* saat dilakukan perhitungan nilai CCT-nya. Grafik yang ditampilkan dibatasi 3 karakteristik grafik, yaitu grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (*sec*), dan grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (*sec*). Sementara grafik daya mekanis (P_m) terhadap waktu (*sec*) dan grafik tegangan internal generator (E_a) terhadap waktu (*sec*) tidak ditampilkan karena terlalu sulit untuk dibedakan kondisi stabil dan kondisi tidak stabilnya. Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang digunakan untuk *plotting* dengan aturan warna pada analisa grafik sistem 3 generator 9 bus Fouad dan Anderson.

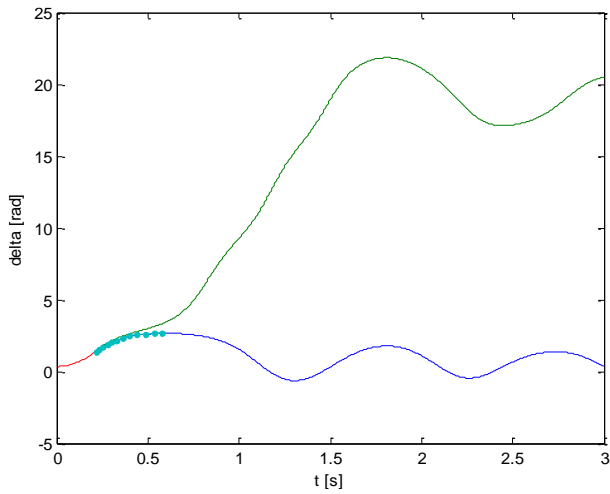
Berikut dilampirkan grafik hasil simulasi dengan menggunakan metode *critical trajectory* pada setiap titik gangguan sistem 2 generator 9 bus Fouad Anderson terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient*.

a. Titik Gangguan B

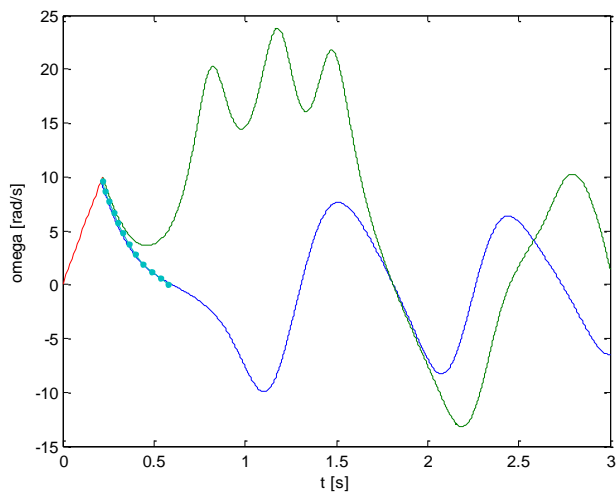
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2128 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,21 – 0,22) sec.



Gambar 4.75. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik B



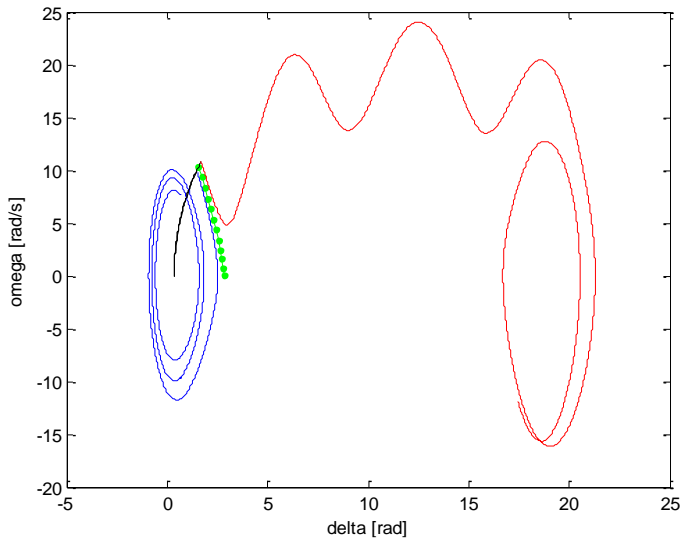
Gambar 4.76. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di B



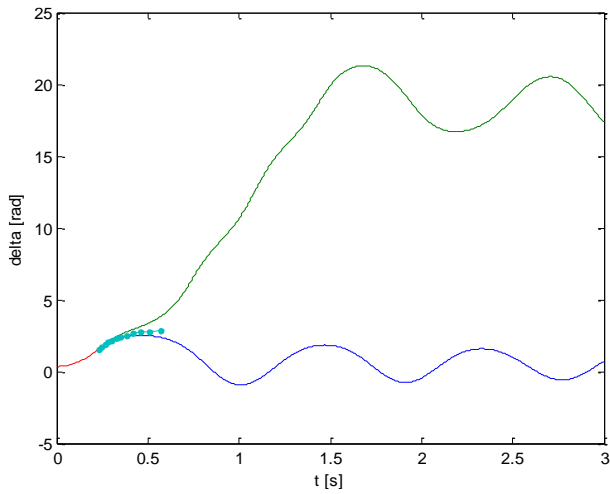
Gambar 4.77. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di B

b. Titik Gangguan G

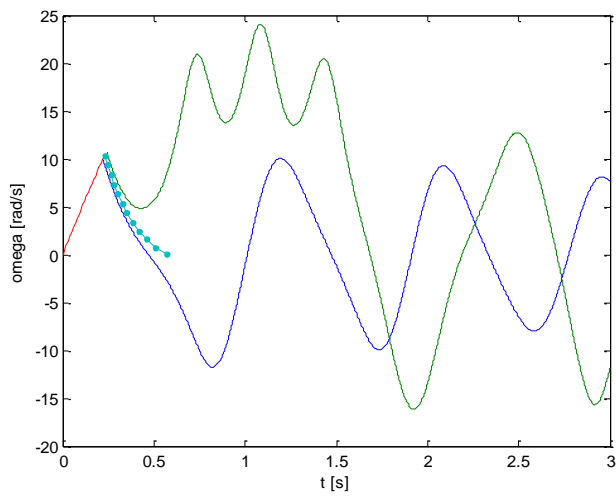
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2289 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,22 – 0,23) sec.



Gambar 4.78. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik G



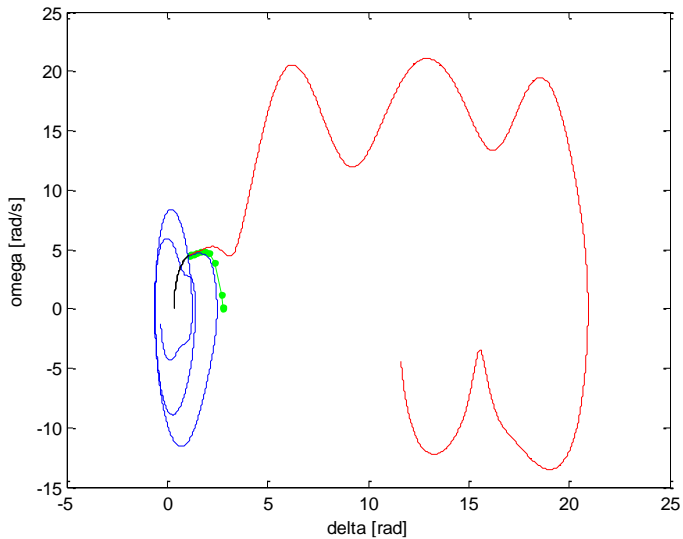
Gambar 4.79. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di G



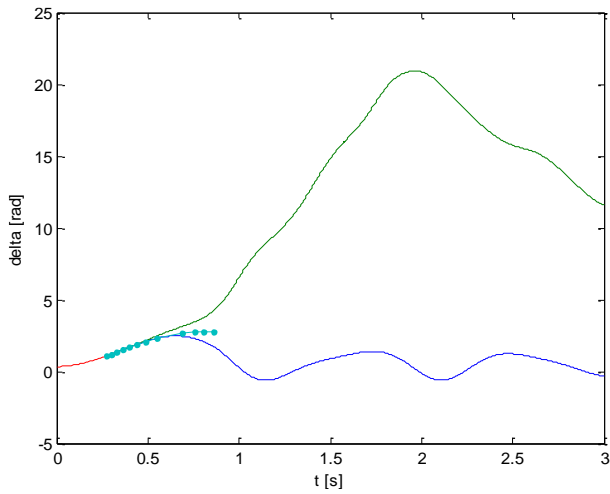
Gambar 4.80. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di G

c. Titik Gangguan H

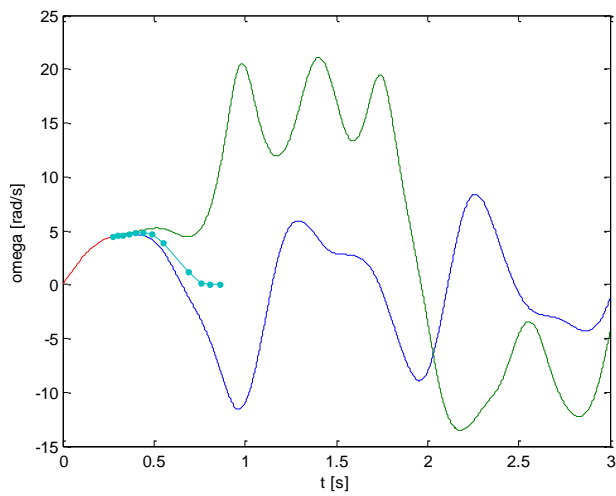
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2746 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,27 – 0,28) sec.



Gambar 4.81. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik H



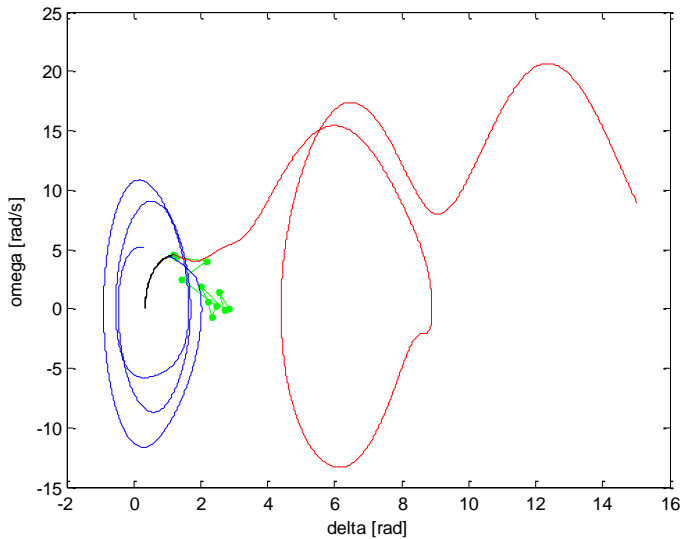
Gambar 4.82. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di H



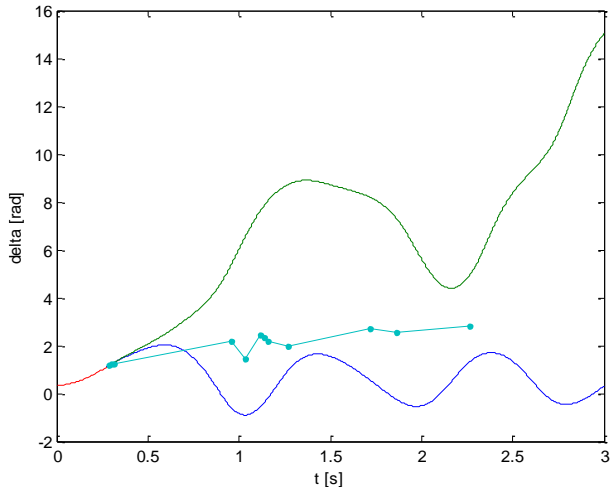
Gambar 4.83. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di H

d. Titik Gangguan I

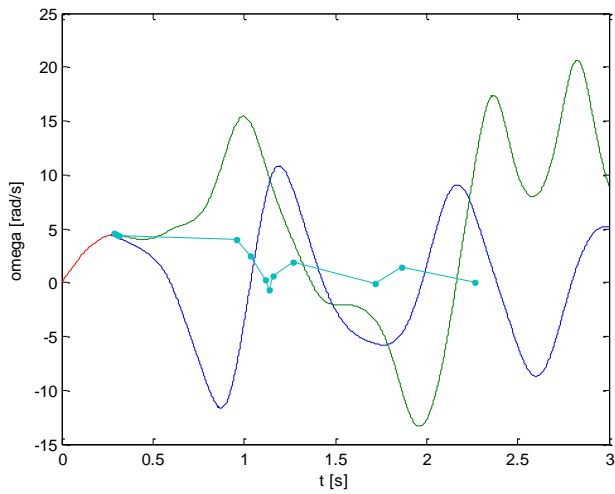
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2910 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,29 – 0,30) sec.



Gambar 4.84. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik I



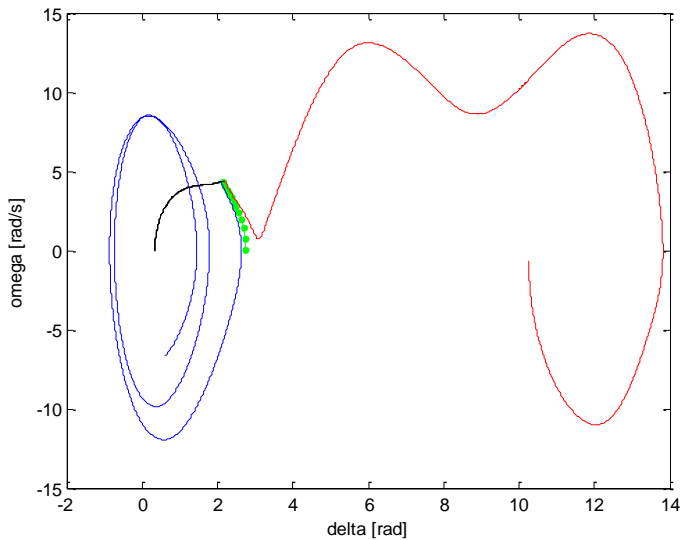
Gambar 4.85. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di I



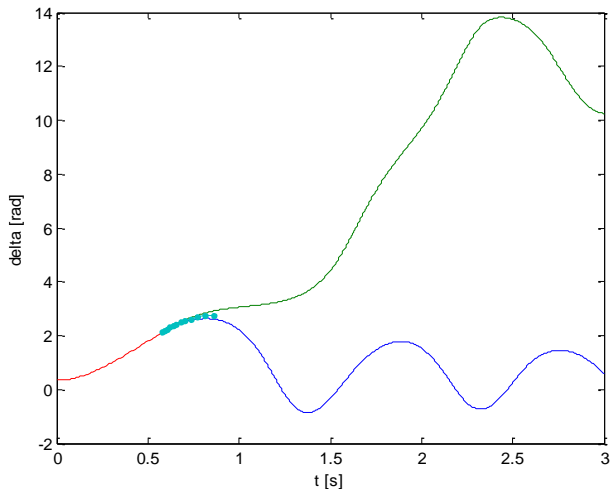
Gambar 4.86. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di I

e. Titik Gangguan J

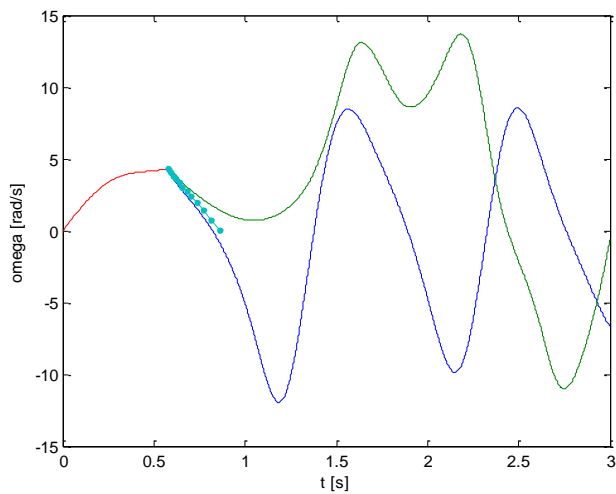
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,5827 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,58 – 0,59) sec.



Gambar 4.87. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik J



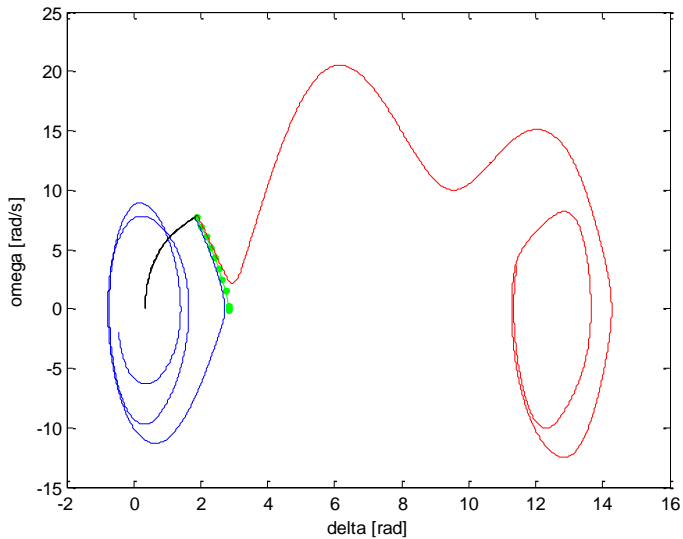
Gambar 4.88. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di J



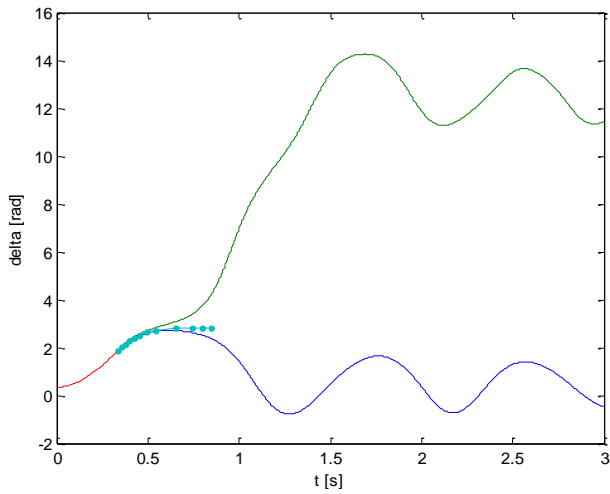
Gambar 4.89. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di J

f. Titik Gangguan K

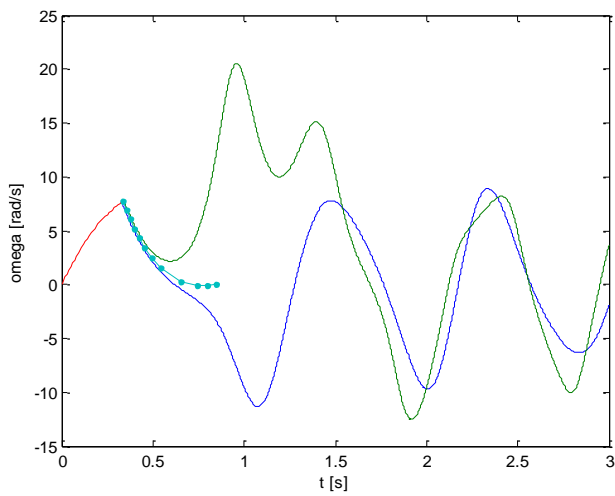
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,3355 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,33 – 0,34) sec.



Gambar 4.90. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila sistem mengalami gangguan di titik K.



Gambar 4.91. Grafik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di K



Gambar 4.92. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 2 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* saat gangguan di K

Gambar 4.75 – Gambar 4.92 menggambarkan grafik perhitungan CCT dengan mempertimbangkan *damping coefficient* pada Tabel 4.10, dimana saat gangguan terjadi di titik B,G,H,I,J,K, metode *critical trajectory* tidak memiliki *error* perhitungan saat dibandingkan dengan metode konvensional TDS. Tapi apabila terjadi gangguan di titik A,C,D,E nilai CCT tidak dapat ditemukan menggunakan kedua metode yang digunakan. Pada kasus khusus di 4 titik gangguan ini, metode konvensional TDS maupun metode *critical trajectory* tidak dapat menyelesaikan perhitungannya, karena pada kasus ini sistem akan selalu kembali ke keadaan stabil.

4.3 Perbandingan Perhitungan CCT pada Sistem 3-Generator 9-Bus Fouad dan Anderson dan Modifikasi Sistem 3-Generator 9-Bus Fouad dan Anderson terhubung *Infinite Bus*

Setelah dilakukan perhitungan CCT pada dua sistem Fouad Anderson yang asli dan dimodifikasi, dapat dibandingkan hasil perhitungan saat sistem *stand-alone* dan saat sistem terhubung dengan *infinite bus*. Berikut tabel perbandingan CCT sistem Fouad dan Anderson.

Tabel 4.11 Perbandingan nilai CCT dengan *critical trajectory* pada sistem 3 generator 9 bus tanpa *damping* dan pada sistem 3 generator 9 bus mempertimbangkan *damping*

Fault Point	Open Line	3 Generator 9 Bus tanpa <i>Damping</i>		3 Generator 9 Bus dengan <i>Damping</i>	
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)
A	1-4	0,3744	0,3757	0,3912	0,4963
B	2-7	0,2306	0,3816	0,2374	0,4054
C	3-9	0,2833	0,3941	0,2990	0,4223
D	4-5	0,3530	0,4674	0,3678	0,4000
E	4-6	0,3530	0,4629	0,3677	0,4891
F	5-7	0,2392	0,3598	0,2465	0,4196
G	7-8	0,2457	0,3751	0,2526	0,3922
H	6-9	0,2748	0,4308	0,2906	0,4437
I	8-9	0,2842	0,6450	0,2994	0,7119

Tabel 4.12 Perbandingan nilai CCT dengan *critical trajectory* pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* tanpa *damping* dan pada sistem 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* mempertimbangkan *damping*

Fault Point	Open Line	2 Generator 9 Bus terhubung <i>infinite bus</i> tanpa <i>Damping</i>		2 Generator 9 Bus terhubung <i>infinite bus</i> dengan <i>Damping</i>	
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)
A	1-4	-	-	-	-
B	2-7	0,2056	0,3826	0,2128	0,3909
C	3-9	-	-	-	-
D	4-5	-	-	-	-
E	4-6	-	-	-	-
G	7-8	0,2216	0,3760	0,2289	0,3804
H	6-9	0,2587	0,4913	0,2746	0,5595
I	8-9	0,2631	1,1213	0,2910	1,1260
J	6-9	0,5250	0,3842	0,5827	0,3841
K	8-9	0,3205	0,5677	0,3355	0,6287

Sesuai Tabel 4.11, dapat ditampilkan perbandingan perhitungan CCT pada sistem yang sama, saat mempertimbangkan *damping coefficient* dan mengabaikan *damping coefficient*. Adanya penambahan *damping coefficient* ternyata memberikan pengaruh yang signifikan pada nilai CCT ($< 0,1 \text{ sec}$). Hal tersebut terjadi karena adanya tambahan waktu sepersekian detik ($< 0,1 \text{ sec}$) pada saat memodelkan generator sinkron yang lengkap dengan *damping coefficient*-nya. Sehingga penambahan *damping coefficient* juga berpengaruh terhadap waktu simulasi perhitungan nilai CCT-nya. Misal pada titik gangguan B, saat mengabaikan *damping* waktu simulasi 0,3816 *sec*, sedangkan saat mempertimbangkan *damping* waktu simulasinya menjadi 0,4054 *sec*. Untuk nilai CCT-nya saat mengabaikan *damping* adalah 0,2306 *sec*, dan saat mempertimbangkan *damping* menjadi sebesar 0,2374 *sec*.

Pada Tabel 4.12, menampilkan perbandingan perhitungan CCT pada sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson yang dimodifikasi menjadi 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus* saat mempertimbangkan dan mengabaikan *damping coefficient*. Adanya *damping coefficient* pada sistem ini juga menambah waktu simulasi perhitungan nilai CCT-nya.

Pemodelan yang dilakukan pada sistem ini juga memakan waktu sedikit lebih lama karena ditambahkannya *damping coefficient* pada setiap generator sinkron yang ada, sehingga nilai CCT juga bertambah nilainya. Misal diamati pada titik gangguan B, saat mengabaikan *damping* waktu simulasinya 0,3826 *sec*, dan saat mempertimbangkan *damping* menjadi 0,3909 *sec*. Sedangkan nilai CCT-nya saat mengabaikan *damping* adalah 0,2056 *sec*, serta saat mempertimbangkan *damping* adalah 0,2128 *sec*.

Selanjutnya, dari kedua tabel tersebut (Tabel 4.11 dan Tabel 4.12) dapat dibandingkan hasil perhitungan nilai CCT yang dihasilkan saat sistem *stand-alone* dan saat sistem terhubung dengan *infinite bus*. Dan dari data secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa saat sistem sedang terhubung dengan *infinite bus*, nilai CCT nya menjadi lebih kecil, yang artinya CB harus lebih cepat trip saat terjadi gangguan pada sistem yang terhubung *infinite bus*. Saat sistem terhubung *infinite bus* (*grid* PLN), nilai arus kontribusi dari *grid* saat *short circuit* mempunyai besar yang signifikan yang sebanding dengan besar daya yang disalurkan *grid*. Mengingat pada modifikasi sistem Fouad Anderson 2 generator 9 bus diatas, pada Gambar 4.56, ketergantungan daya dari *infinite bus* masih besar. Sehingga nilai arus kontribusi dari *grid* juga besar. Sesuai rumus:

$$S = V \times I$$

Dimana:

S = Daya (*Watt*)

V = Tegangan (*Volt*)

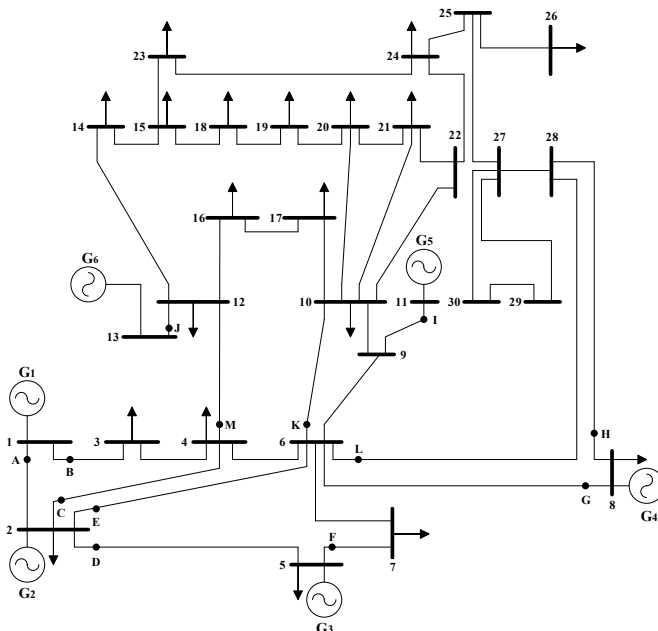
I = Arus (*Ampere*)

Karena arus semakin besar, dan kemampuan peralatan yang tetap (*bracing capacity* dari bus dan CB), maka waktu maksimal peralatan untuk menahan arus *short circuit* juga semakin berkurang. Sehingga, waktu CB untuk memutus saluran yang mengalami gangguan (CCT) juga harus semakin cepat, untuk menjaga keawetan peralatan, atau bahkan mencegah kerusakan dari peralatan sistem tenaga.

4.4 CCT pada Sistem 6-generator 30-Bus IEEE dengan Mempertimbangkan Kontroler dan *Damping Coefficient*

Selanjutnya metode *critical trajectory* akan diterapkan pada *plant* IEEE 6 generator 30 bus. Setelah dibandingkan perhitungan CCT saat setiap generator mengabaikan dan mempertimbangkan *damping*

coefficient pada sub-bab sebelumnya, didapatkan data bahwa perhitungan CCT saat mempertimbangkan *damping* menjadi lebih besar karena pemodelan sistem menjadi lebih kompleks. Karena pada kenyataannya selalu terdapat *damping* pada setiap generator, maka pada sub-bab kali ini dilakukan perhitungan nilai CCT pada *plant* yang mempertimbangkan *damping* saja. Mengingat perhitungan nilai CCT pada *plant* yang mengabaikan *damping* juga sudah diketahui pada sub-bab sebelumnya. Perhitungan yang akan dilakukan pada *plant* ini juga sama seperti pada *plant* sebelumnya, yaitu setelah menjalankan program BCU-Shadowing akan didapatkan nilai CUEP dan indeks energi potensial dari setiap generator yang ada. Sehingga generator yang akan dijadikan sebagai generator kritis sudah ditemukan untuk nantinya dimasukkan pada *weighting matrix*. Berikut *single line diagram* dari sistem 6 generator 30 bus IEEE tersebut:



Gambar 4.93 Sistem 6-generator 30-bus IEEE

Dari Gambar 4.93 telah ditentukan letak gangguan terjadi, yaitu di masing-masing titik pada saluran transmisi dengan kode A-I. Gangguan diasumsikan terjadi di 10 titik saluran transmisi tersebut, dengan asumsi:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan 2, dekat bus 1
- B : titik gangguan antara bus 1 dan 3, dekat bus 1
- C : titik gangguan antara bus 2 dan 4, dekat bus 2
- D : titik gangguan antara bus 2 dan 5, dekat bus 2
- E : titik gangguan antara bus 2 dan 6, dekat bus 2
- F : titik gangguan antara bus 5 dan 7, dekat bus 5
- G : titik gangguan antara bus 6 dan 8, dekat bus 8
- H : titik gangguan antara bus 8 dan 28, dekat bus 8
- I : titik gangguan antara bus 9 dan 11, dekat bus 11
- J : titik gangguan antara bus 12 dan 13, dekat bus 13

Sedangkan untuk spesifikasi data dari saluran transmisi sistem dan spesifikasi data dari bus sistem dilampirkan secara berturut-turut pada Tabel 4.13 dan Tabel 4.14.

4.4.1 Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT

Terdapat beberapa parameter yang harus diinputkan terlebih dahulu sebelum dapat dilakukan perhitungan CCT. Parameter-parameter tersebut didapatkan setelah dilakukan perhitungan analisa aliran daya.

Tabel 4.13 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 6 generator 30 bus IEEE

No.	Bus asal	Bus dituju	R	X	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204
3	2	4	0,0570	0,1737	0,0184
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045
8	5	7	0,0460	0,1160	0,0102
9	6	7	0,0267	0,0820	0,0085
10	6	8	0,0120	0,0420	0,0045
11	6	9	0,0000	0,2080	0,0000
12	6	10	0,0000	0,5560	0,0000

No.	Bus asal	Bus dituju	R	X	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
13	9	11	0,0000	0,2080	0,0000
14	4	12	0,0000	0,2560	0,0000
15	12	13	0,0000	0,1400	0,0000
16	12	14	0,1231	0,2559	0,0000
17	12	15	0,0662	0,1304	0,0000
18	12	16	0,0945	0,1987	0,0000
19	14	15	0,2210	0,1997	0,0000
20	16	17	0,0824	0,1923	0,0000
21	15	18	0,1070	0,2185	0,0000
22	18	19	0,0639	0,1292	0,0000
23	19	20	0,0340	0,0680	0,0000
24	10	20	0,0936	0,2090	0,0000
25	10	17	0,0324	0,0845	0,0000
26	10	21	0,0348	0,0749	0,0000
27	10	22	0,0727	0,1499	0,0000
28	21	22	0,0116	0,0236	0,0000
29	15	23	0,1000	0,2020	0,0000
30	22	24	0,1150	0,1790	0,0000
31	23	24	0,1320	0,2700	0,0000
32	24	25	0,1885	0,3292	0,0000
33	25	26	0,2544	0,3800	0,0000
34	25	27	0,1093	0,2087	0,0000
35	27	28	0,0000	0,3960	0,0000
36	27	29	0,2198	0,4153	0,0000
37	27	30	0,3202	0,6027	0,0000
38	29	30	0,2399	0,4533	0,0000
39	8	28	0,0636	0,2000	0,0214
40	6	28	0,0169	0,0599	0,0065
41	9	10	0,0000	0,1100	0,0000

Tabel 4.14 Spesifikasi data bus sistem 6 generator 30 bus IEEE

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	50,00	0,00	21,70	12,70
3	0,00	0,00	2,40	1,20

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
4	0,00	0,00	7,60	1,60
5	105,00	0,00	94,20	19,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	22,80	10,90
8	50,00	0,00	30,00	30,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	5,80	2,00
11	20,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	11,20	7,50
13	20,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	6,20	1,60
15	0,00	0,00	8,20	2,50
16	0,00	0,00	3,50	1,80
17	0,00	0,00	9,00	5,80
18	0,00	0,00	3,20	0,90
19	0,00	0,00	9,50	3,40
20	0,00	0,00	2,20	0,70
21	0,00	0,00	17,50	11,20
22	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	3,20	1,60
24	0,00	0,00	8,70	6,70
25	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,00	0,00	3,50	2,30
27	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00
29	0,00	0,00	2,40	0,90
30	0,00	0,00	10,60	1,90

Berikut dilampirkan parameter yang didapatkan dari sistem, untuk di-*input*-kan pada perhitungan selanjutnya. Parameter tersebut antara lain :

1. Daya mekanis generator (P_m)
2. Tegangan bus generator (V)
3. Daya total generator (S)
4. Tegangan generator (E_a)

Tabel 4.15 Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa *power flow*

Generator	$P_m (p.u)$	$V (p.u)$	$S (p.u)$	$E_a (p.u)$
1	0,0093	1,0600	0,0093 - j4,8018	1,0600
2	0,4290	0,0000	0,4290 - j0,5446	1,1675
3	0,6399	1,0575	0,6399 - j2,1791	0,9567
4	0,7304	0,8930	0,7304 - j2,4767	0,9873
5	0,4270	0,7313	0,4270 - j1,2811	1,1414
6	0,3247	0,7584	0,3247 - j1,2181	1,1154

Setelah didapatkan parameter-parameter sesuai pada Tabel 4.15, dapat dikerjakan perhitungan untuk menentukan nilai CCT pada masing-masing titik gangguan.

4.4.2 Perhitungan CCT pada sistem 6 generator 30 bus IEEE dengan mempertimbangkan *damping*

Selanjutnya setelah didapatkan parameter-parameter yang diperlukan, dapat dilakukan perhitungan CCT pada sistem 6 generator 30 bus dari IEEE sesuai Gambar 4.93. Pada desain *single line diagram* tersebut, diasumsikan setiap saluran transmisi adalah *double circuit*/saluran ganda, dan gangguan 3 fasa terjadi di bus yang lebih dekat dengan titik gangguan pada salah satu saluran transmisinya. Dan beberapa saat kemudian, gangguan dapat dihilangkan dengan membuka CB di kedua ujung saluran transmisinya, sesuai penjelasan yang telah dijabarkan pada sub-bab 3.3.

Simulasi yang akan dilakukan berikut mempertimbangkan *damping coefficient* yang terdapat pada setiap generator. Lalu metode *critical trajectory* akan dibandingkan pula dengan metode konvensional TDS untuk dianalisa error serta beberapa aspek lainnya. Nilai CCT hasil perbandingan kedua metode tersebut dilampirkan pada Tabel 4.16 berikut. Hasil perhitungan pada tabel tersebut menyatakan bahwa nilai CCT berbeda di setiap titik gangguannya. Misalkan, pada gangguan A, CCT dari metode TDS adalah 0,98-0,99. Hal ini berarti sistem stabil sampai detik 0,98 dan sudah tidak stabil saat detik 0,99. Maka dapat diamati bahwa nilai CCT dari *critical trajectory* akan berada diantara *range* waktu dari hasil simulasi TDS tersebut.

Tabel 4.16 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan *damping*

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,9843	2,8549	0,98-0,99	120,17	0,0
B	1-3	0,9973	1,8937	0,99-1,00	120,33	0,0
C	2-4	1,0222	2,8464	1,02-1,03	120,38	0,0

Waktu simulasi (*CPU time*) tergantung dari kecepatan processor dan spesifikasi dari perangkat yang digunakan. Waktu simulasi dari metode konvensional TDS lebih lama 10 kali lipat daripada metode *critical trajectory* untuk mendapatkan nilai CCT-nya, dan didapatkan dengan cara *trial and error* untuk setiap titik gangguan. Bila diasumsikan untuk mendapatkan *range* waktu stabil dan tidak stabilnya membutuhkan 10 kali percobaan dimana di setiap percobaannya diasumsikan membutuhkan waktu 10 detik ditambah waktu *running* programnya, maka dapat dirumuskan waktu simulasi (*CPU time*) untuk mendapatkan *range* waktu antara stabil dan tidak stabilnya adalah:

$$CPU[s] = 10 \times (10 + \text{waktu running program})$$

Sedangkan waktu simulasi dari metode *critical trajectory* didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Nilai *error* didapatkan dari selisih nilai CCT hasil perhitungan metode *critical trajectory* dan batas bawah *range* stabil (*rs*) atau batas atas *range* tidak stabil (*ru*) hasil perhitungan metode TDS. Apabila nilai CCT berada lebih dari *range* tidak stabil maka menggunakan *ru*, sedangkan apabila nilai CCT berada kurang dari *range* stabil maka menggunakan *rs*. Sehingga *error* bisa bernilai positif atau negatif. Berikut perumusan untuk mencari nilai *error*-nya saat bernilai positif:

$$error(+) = \frac{CCT - ru}{ru}$$

Dan berikut perumusan untuk mencari nilai *error*-nya saat bernilai negatif:

$$error(-) = \frac{CCT - rs}{rs}$$

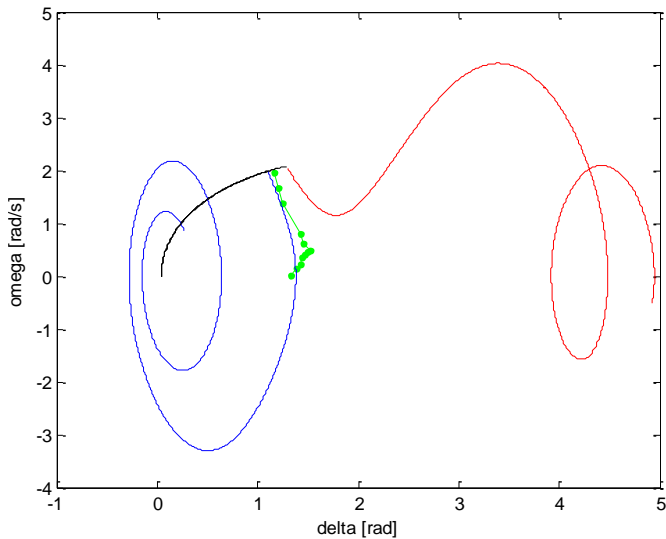
Sesuai Tabel 4.16, dapat diamati bahwa nilai *error* setiap titik adalah 0%. Bila gangguan terjadi selain pada titik gangguan selain 3 titik tersebut (titik gangguan A,B, dan C), sistem dapat kembali ke keadaan stabil. Oleh karena itu, perhitungan CCT selain pada ketiga titik tersebut tidak dicantumkan pada Tabel 4.16.

4.4.3 Analisis grafik pada sistem 6 generator 30 bus IEEE dengan mempertimbangkan *damping*

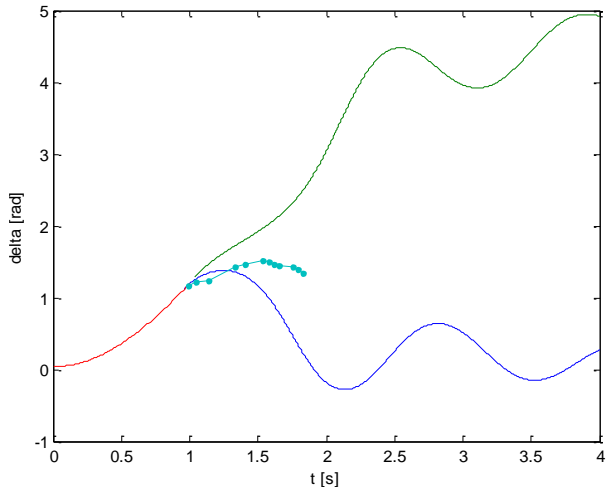
Pada Gambar 4.94 – Gambar 4.102 berikut dilampirkan grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* pada perhitungannya. Grafik yang ditampilkan yaitu grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (*sec*), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (*sec*). Sedangkan grafik daya mekanis (P_m) terhadap waktu (*sec*) dan grafik tegangan internal generator (E_a) terhadap waktu (*sec*) tidak ditampilkan karena dinilai sulit untuk dapat dibedakan kondisi stabil dan kondisi tidak stabilnya. Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang digunakan untuk *plotting*. Warna pada ketiga kurva tersebut disajikan dengan fungsi dan warna yang sama seperti saat dilakukan penggambaran grafik pada sub-bab sebelumnya. Maka hasil simulasi dengan menggunakan metode *critical trajectory* pada setiap titik gangguan pada sistem adalah sebagai berikut.

a. Titik Gangguan A

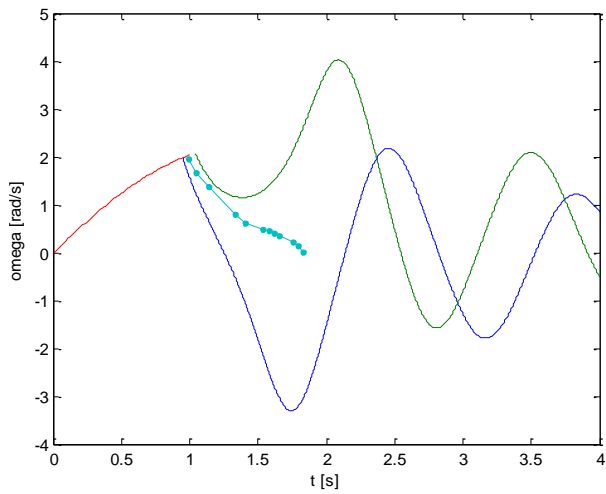
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,9843 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,98 – 0,99) sec.



Gambar 4.94. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila mengalami gangguan di titik A



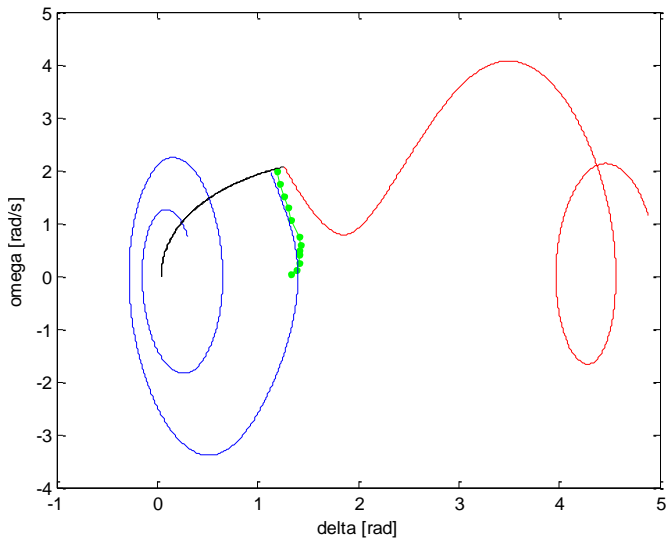
Gambar 4.95. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 6 generator 30 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik A



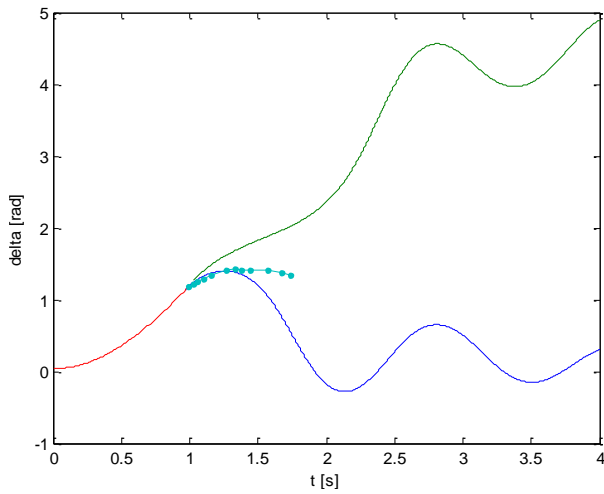
Gambar 4.96. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 6 generator dengan *damping* bila gangguan terjadi di A

b. Titik Gangguan B

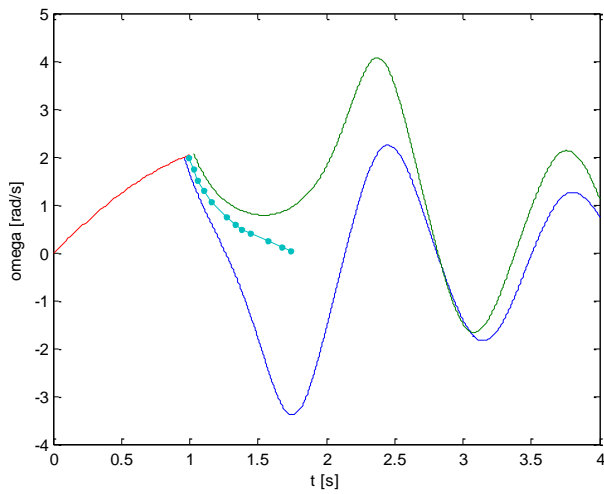
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,9973 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,99 – 1,00) sec.



Gambar 4.97. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila mengalami gangguan di titik B



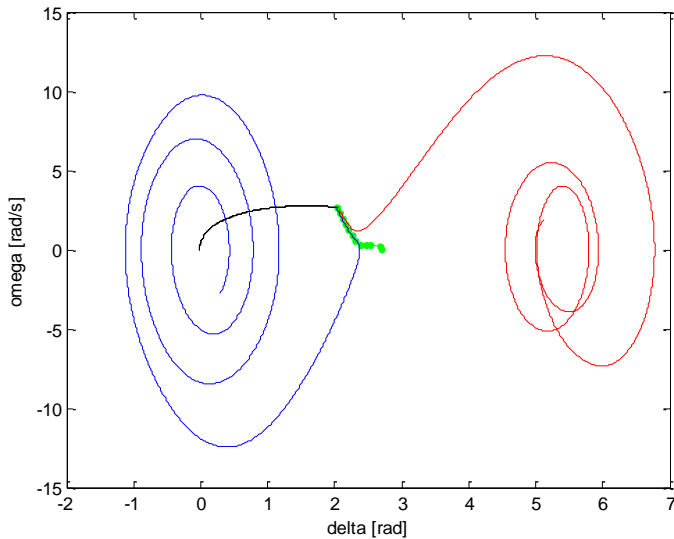
Gambar 4.98. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 6 generator 30 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik B



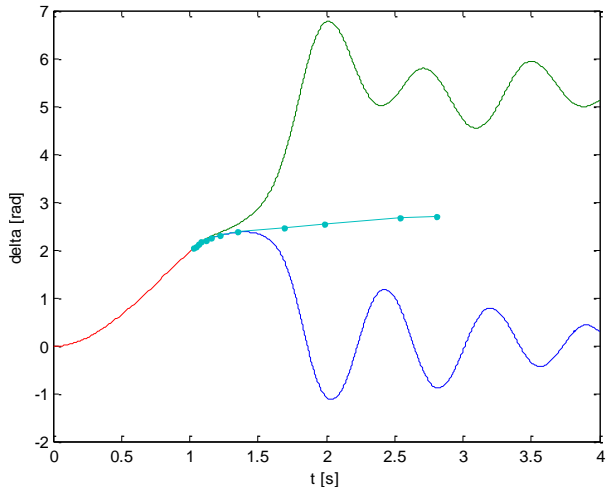
Gambar 4.99. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 6 generator 30 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di B

c. Titik Gangguan C

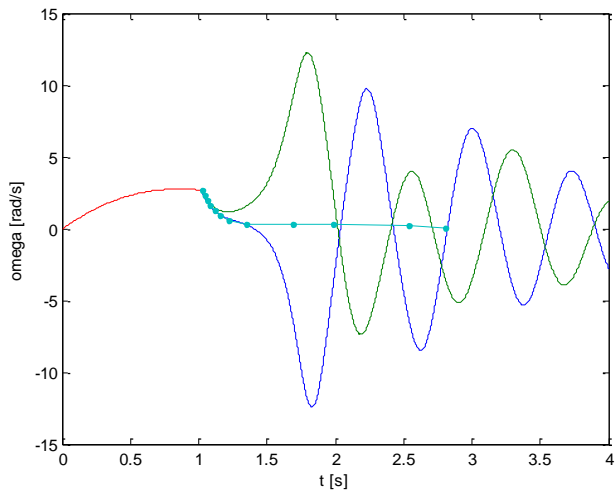
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 1,0222 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah *range* antara (1,03 – 1,04) sec.



Gambar 4.100. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 6 generator 30 bus dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila mengalami gangguan di titik C



Gambar 4.101. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 6 generator 30 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di titik C



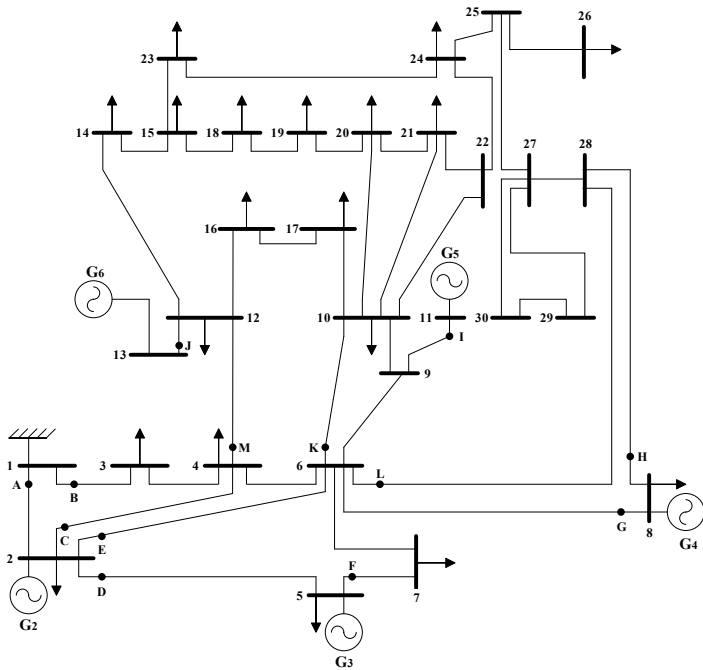
Gambar 4.102. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 6 generator 30 bus dengan *damping* bila gangguan terjadi di C

Pada grafik yang disajikan pada Gambar 4.94 – Gambar 4.102 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutuskan gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil maka sesuai *stable trajectory*, sistem akan beresilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutuskan gangguan lebih dari waktu tidak stabil maka sesuai *unsable trajectory*, sistem akan beresilasi ke keadaan tidak stabil setelah mengalami gangguan. Grafik yang ditampilkan diatas hanya pada ketiga titik gangguan A,B,dan C, untuk dapat mengamati nilai CCT yang benar-benar berada diantara titik stabil dan tidak stabil sistem setelah mengalami gangguan. Sementara grafik untuk titik gangguan yang lain (C,D,E,F,G,H,I,J,K,L) tidak ditampilkan karena hasil simulasi menunjukkan sistem tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi pada titik-titik lain tersebut, sehingga tidak terlalu dapat diamati dimana letak nilai CCT (yang seharusnya diantara titik stabil dan titik tidak stabil) setelah gangguan terjadi.

4.5 CCT pada Sistem 5-generator 30-Bus IEEE dengan Mempertimbangkan Kontroler dan *Damping Coefficient* terhubung *Infinite Bus*

Setelah pada sub-bab sebelumnya metode *critical trajectory* diterapkan pada *plant* IEEE 6 generator 30 bus, pada sub-bab ini dilakukan modifikasi pada *plant* IEEE 6 generator 30 bus menjadi 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus*. Pada beberapa sub-bab sebelumnya telah dilakukan perbandingan perhitungan nilai CCT saat setiap generator mengabaikan dan mempertimbangkan *damping coefficient*. Dari perhitungan tersebut didapatkan kesimpulan bahwa data perhitungan CCT saat mempertimbangkan *damping* menjadi lebih besar karena pemodelan sistem menjadi lebih kompleks. Karena pada sistem nyata selalu terdapat *damping* pada setiap generator, maka pada sub-bab kali ini dilakukan perhitungan nilai CCT pada *plant* yang mempertimbangkan *damping* saja, untuk menyamakan keadaan *plant* pada simulasi sesuai keadaan *plant* pada umumnya. Perhitungan yang akan dilakukan pada *plant* ini juga sama seperti pada *plant* sebelumnya, yaitu setelah menjalankan program BCU-Shadowing akan didapatkan nilai CUEP dan indeks energi potensial dari setiap generator yang ada. Sehingga generator yang akan dijadikan sebagai generator kritis sudah ditemukan untuk nantinya dimasukkan pada *weighting matrix*. Desain

single line diagram dari sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* IEEE hasil modifikasi ditampilkan pada Gambar 4.127 sebagai berikut:



Gambar 4.103 Sistem 5-generator 30-bus IEEE terhubung *infinite bus*

Dari Gambar 4.103 telah ditentukan letak gangguan terjadi, yaitu di masing-masing titik pada saluran transmisi dengan kode A-M. Gangguan diasumsikan terjadi di 10 titik saluran transmisi tersebut, dengan asumsi:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan 2, dekat bus 1
- B : titik gangguan antara bus 1 dan 3, dekat bus 1
- C : titik gangguan antara bus 2 dan 4, dekat bus 2
- D : titik gangguan antara bus 2 dan 5, dekat bus 2
- E : titik gangguan antara bus 2 dan 6, dekat bus 2
- F : titik gangguan antara bus 5 dan 7, dekat bus 5
- G : titik gangguan antara bus 6 dan 8, dekat bus 8
- H : titik gangguan antara bus 8 dan 28, dekat bus 8
- I : titik gangguan antara bus 9 dan 11, dekat bus 11
- J : titik gangguan antara bus 12 dan 13, dekat bus 13

- K : titik gangguan antara bus 6 dan 10, dekat bus 6
- L : titik gangguan antara bus 6 dan 28, dekat bus 6
- M : titik gangguan antara bus 4 dan 12, dekat bus 4

Sedangkan untuk spesifikasi data dari saluran transmisi sistem dan spesifikasi data dari bus sistem dilampirkan secara berturut-turut pada Tabel 4.17 dan Tabel 4.18.

4.5.1 Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT

Terdapat beberapa parameter yang harus diinputkan terlebih dahulu sebelum dapat dilakukan perhitungan CCT. Parameter-parameter tersebut didapatkan setelah dilakukan perhitungan analisa aliran daya.

Tabel 4.17 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 5 generator 30 bus IEEE terhubung *infinite bus*

No.	Bus asal	Bus dituju	R	X	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204
3	2	4	0,0570	0,1737	0,0184
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045
8	5	7	0,0460	0,1160	0,0102
9	6	7	0,0267	0,0820	0,0085
10	6	8	0,0120	0,0420	0,0045
11	6	9	0,0000	0,2080	0,0000
12	6	10	0,0000	0,5560	0,0000
13	9	11	0,0000	0,2080	0,0000
14	4	12	0,0000	0,2560	0,0000
15	12	13	0,0000	0,1400	0,0000
16	12	14	0,1231	0,2559	0,0000
17	12	15	0,0662	0,1304	0,0000
18	12	16	0,0945	0,1987	0,0000
19	14	15	0,2210	0,1997	0,0000
20	16	17	0,0824	0,1923	0,0000
21	15	18	0,1070	0,2185	0,0000
22	18	19	0,0639	0,1292	0,0000

No.	Bus asal	Bus dituju	R	X	Half Line Charging Susceptance (p.u)
23	19	20	0,0340	0,0680	0,0000
24	10	20	0,0936	0,2090	0,0000
25	10	17	0,0324	0,0845	0,0000
26	10	21	0,0348	0,0749	0,0000
27	10	22	0,0727	0,1499	0,0000
28	21	22	0,0116	0,0236	0,0000
29	15	23	0,1000	0,2020	0,0000
30	22	24	0,1150	0,1790	0,0000
31	23	24	0,1320	0,2700	0,0000
32	24	25	0,1885	0,3292	0,0000
33	25	26	0,2544	0,3800	0,0000
34	25	27	0,1093	0,2087	0,0000
35	27	28	0,0000	0,3960	0,0000
36	27	29	0,2198	0,4153	0,0000
37	27	30	0,3202	0,6027	0,0000
38	29	30	0,2399	0,4533	0,0000
39	8	28	0,0636	0,2000	0,0214
40	6	28	0,0169	0,0599	0,0065
41	9	10	0,0000	0,1100	0,0000

Tabel 4.18 Spesifikasi data bus sistem 5 generator 30 bus IEEE terhubung *infinite bus*

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	50,00	0,00	21,70	12,70
3	0,00	0,00	2,40	1,20
4	0,00	0,00	7,60	1,60
5	105,00	0,00	94,20	19,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	22,80	10,90
8	50,00	0,00	30,00	30,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	5,80	2,00
11	20,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	11,20	7,50
13	20,00	0,00	0,00	0,00

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
14	0,00	0,00	6,20	1,60
15	0,00	0,00	8,20	2,50
16	0,00	0,00	3,50	1,80
17	0,00	0,00	9,00	5,80
18	0,00	0,00	3,20	0,90
19	0,00	0,00	9,50	3,40
20	0,00	0,00	2,20	0,70
21	0,00	0,00	17,50	11,20
22	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	3,20	1,60
24	0,00	0,00	8,70	6,70
25	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,00	0,00	3,50	2,30
27	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00
29	0,00	0,00	2,40	0,90
30	0,00	0,00	10,60	1,90

Berikut dilampirkan parameter yang didapatkan dari sistem, untuk dimasukkan pada perhitungan selanjutnya. Parameter tersebut antara lain :

1. Daya mekanis generator (P_m)
2. Tegangan bus generator (V)
3. Daya total generator (S)
4. Tegangan generator (E_a)

Tabel 4.19 Parameter data yang didapatkan setelah dilakukan analisa *power flow*

Generator	$P_m (p.u)$	$V (p.u)$	$S (p.u)$	$E_a (p.u)$
1	0,0093	1,0600	0,0093 - j4,8018	1,0600
2	0,4290	0,0000	0,4290 - j0,5446	1,1675
3	0,6399	1,0575	0,6399 - j2,1791	0,9567
4	0,7304	0,8930	0,7304 - j2,4767	0,9873
5	0,4270	0,7313	0,4270 - j1,2811	1,1414
6	0,3247	0,7584	0,3247 - j1,2181	1,1154

Setelah didapatkan parameter-parameter hasil perhitungan *power flow* sesuai pada Tabel 4.19, dapat dilanjutkan perhitungan untuk

menentukan nilai CCT pada masing-masing titik gangguan yang telah ditentukan sebelumnya pada Gambar 4.102.

4.5.2 Perhitungan CCT pada sistem 5 generator 30 bus IEEE terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping*

Selanjutnya setelah didapatkan parameter-parameter yang diperlukan dari hasil perhitungan *power flow* pada sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* dari IEEE sesuai Gambar 4.127, dapat dilakukan perhitungan CCT pada sistem tersebut. Sama seperti sebelumnya, pada desain *single line diagram* tersebut, diasumsikan setiap saluran transmisi adalah *double circuit*/saluran ganda, dan gangguan 3 fasa terjadi di bus yang lebih dekat dengan titik gangguan pada salah satu saluran stansmisinya. Dan beberapa saat kemudian, gangguan dapat dihilangkan dengan membuka CB di kedua ujung saluran transmisinya, sesuai penjelasan pada sub-bab 3.3.

Simulasi yang akan dilakukan berikut mempertimbangkan *damping coefficient* yang terdapat pada setiap generator. Lalu metode *critical trajectory* akan dibandingkan pula dengan metode konvensional TDS untuk dianalisa error serta beberapa aspek lainnya. Nilai CCT hasil perbandingan kedua metode tersebut dilampirkan pada Tabel 4.16 berikut. Hasil perhitungan pada tabel tersebut menyatakan bahwa nilai CCT berbeda di setiap titik gangguannya. Misalkan, pada gangguan A, CCT dari metode TDS adalah 0,98-0,99. Hal ini berarti sistem stabil sampai detik 0,98 dan sudah tidak stabil saat detik 0,99 . Maka dapat diamati bahwa nilai CCT dari *critical trajectory* akan berada diantara *range* waktu dari hasil simulasi TDS tersebut.

Tabel 4.20 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* dengan *damping*

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
C	2-4	0,9600	2,4325	0,96-0,97	119,16	0,0
D	2-5	0,9591	0,9878	0,95-0,96	119,08	0,0
E	2-6	0,9597	0,8425	0,84-0,85	119,33	0,0
M	4-12	0,5833	1,7335	0,58-0,59	120,40	0,0

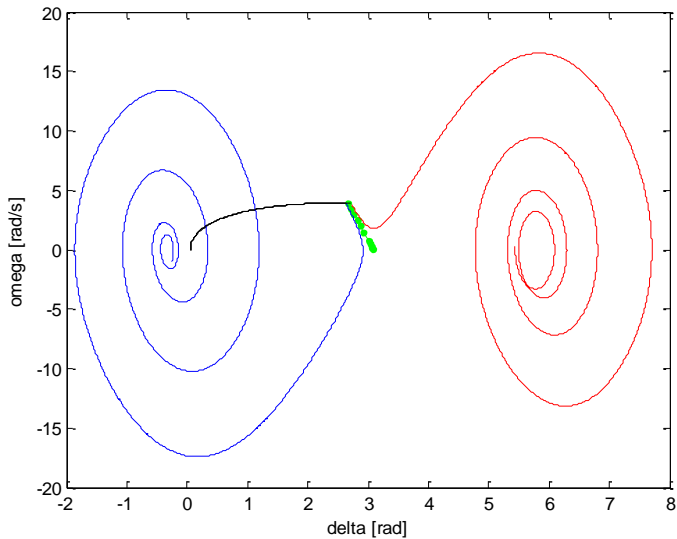
Sesuai Tabel 4.20, dapat diamati bahwa nilai *error* setiap titik adalah 0%. Bila gangguan terjadi selain pada titik gangguan selain 4 titik tersebut (titik gangguan C,D,E,M), sistem dapat kembali ke keadaan stabil. Oleh karena itu, perhitungan CCT pada saat gangguan terjadi selain di 4 titik tersebut tidak dicantumkan pada Tabel 4.20, karena sistem dianggap tidak memiliki masalah untuk menuju ke keadaan tidak stabil.

4.5.3 Analisis grafik pada sistem 5 generator 30 bus IEEE terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping*

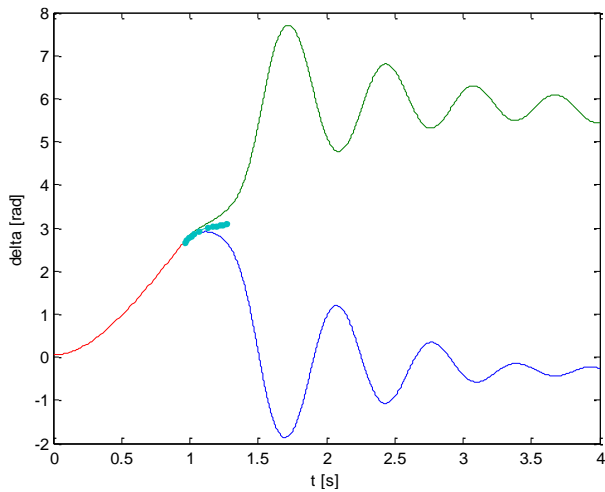
Pada Gambar 4.103 – Gambar 4.114 berikut dilampirkan grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* pada perhitungannya. Grafik yang ditampilkan yaitu grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (*sec*), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (*sec*). Sedangkan grafik daya mekanis (P_m) terhadap waktu (*sec*) dan grafik tegangan internal generator (E_a) terhadap waktu (*sec*) tidak ditampilkan karena dinilai sulit untuk dapat dibedakan kondisi stabil dan kondisi tidak stabilnya. Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang digunakan untuk *plotting*. Warna pada ketiga kurva tersebut disajikan dengan fungsi dan warna yang sama seperti saat dilakukan penggambaran grafik pada sub-bab sebelumnya. Maka hasil simulasi dengan menggunakan metode *critical trajectory* pada setiap titik gangguan pada sistem adalah sebagai berikut.

a. Titik Gangguan C

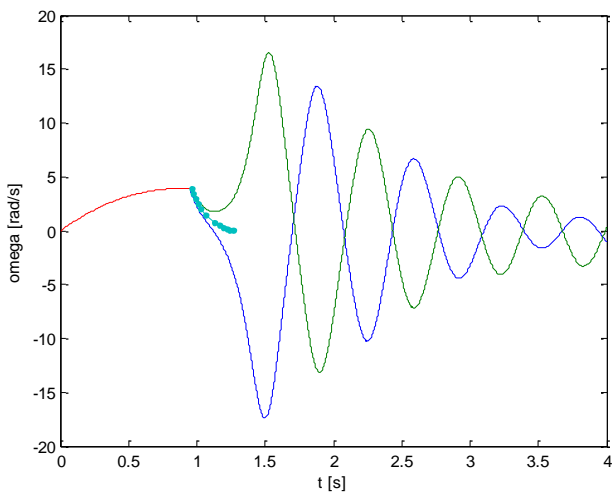
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,9600 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah *range* antara (0,96 – 0,97) sec.



Gambar 4.104. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila mengalami gangguan di titik C



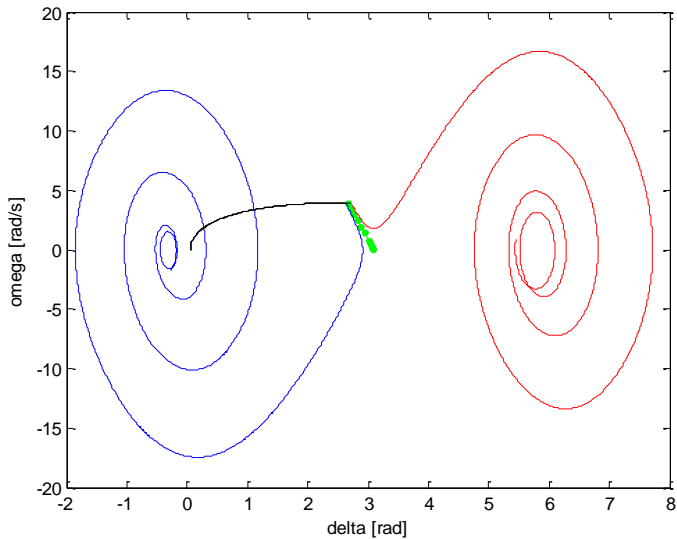
Gambar 4.105. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di C



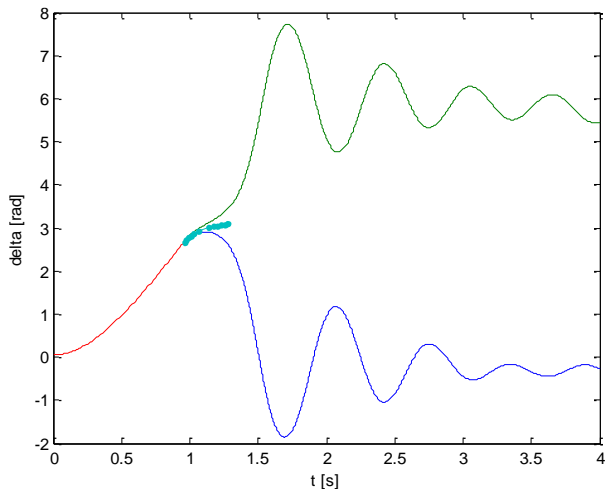
Gambar 4.106. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di C

b. Titik Gangguan D

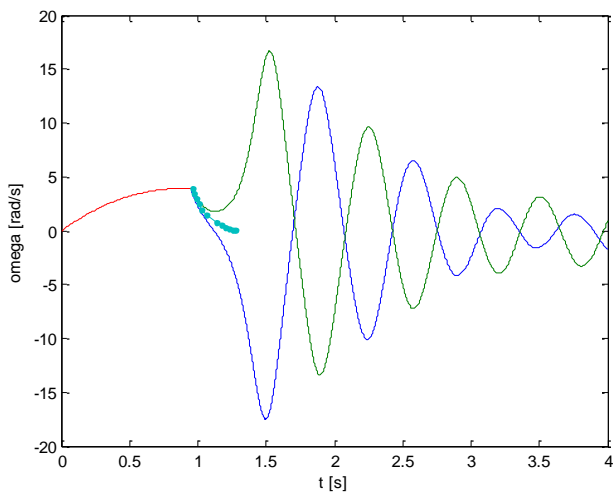
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,9591 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,95 – 0,96) sec.



Gambar 4.107. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila mengalami gangguan di titik D



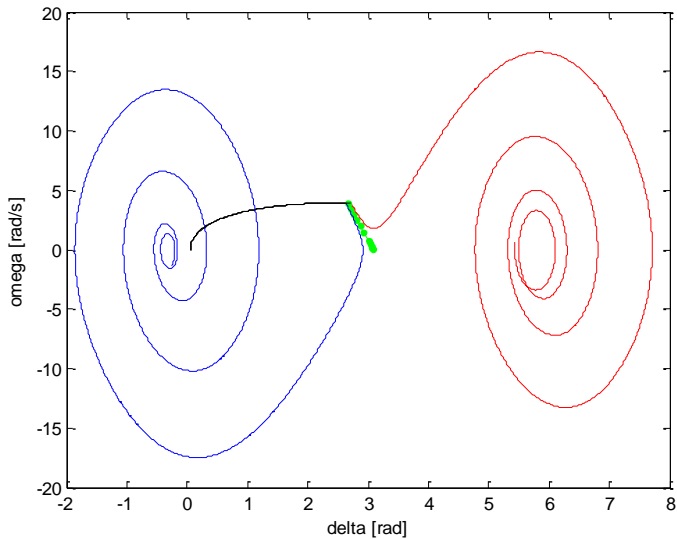
Gambar 4.108. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di D



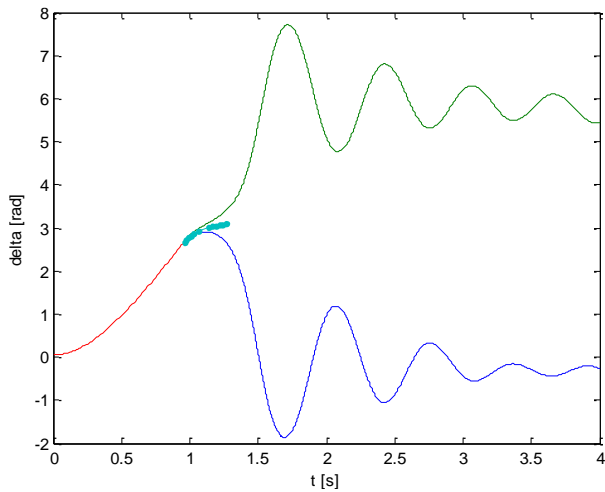
Gambar 4.109. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di D

c. Titik Gangguan E

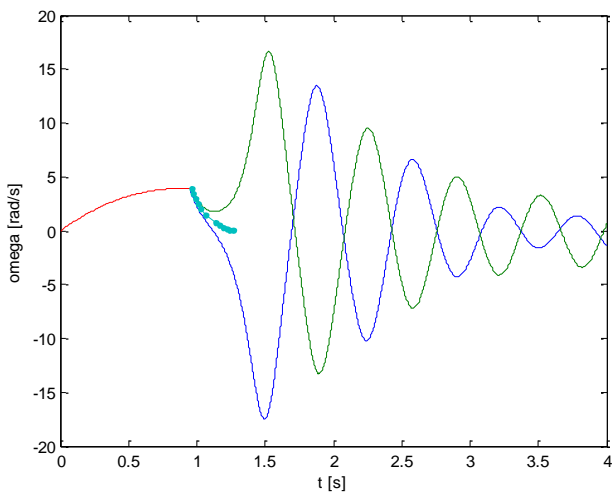
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,9597 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,95 – 0,96) sec.



Gambar 4.110. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila mengalami gangguan di titik E



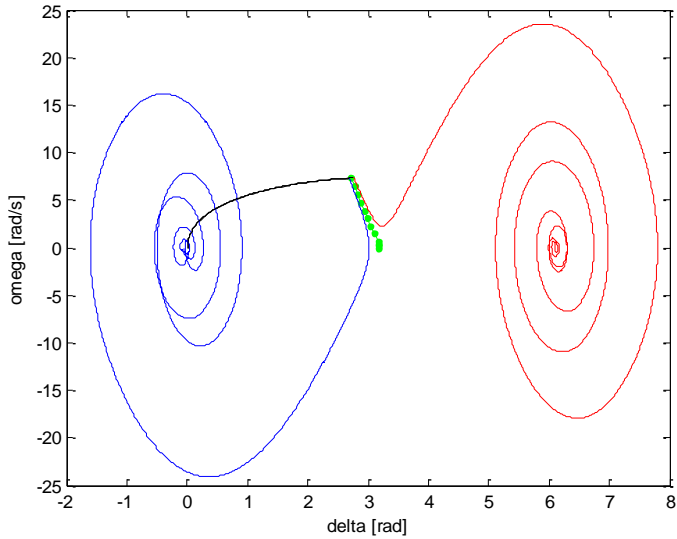
Gambar 4.111. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di E



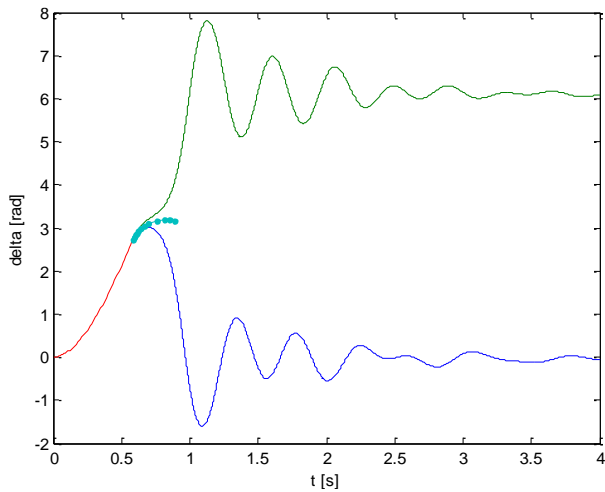
Gambar 4.112. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di E

d. Titik Gangguan M

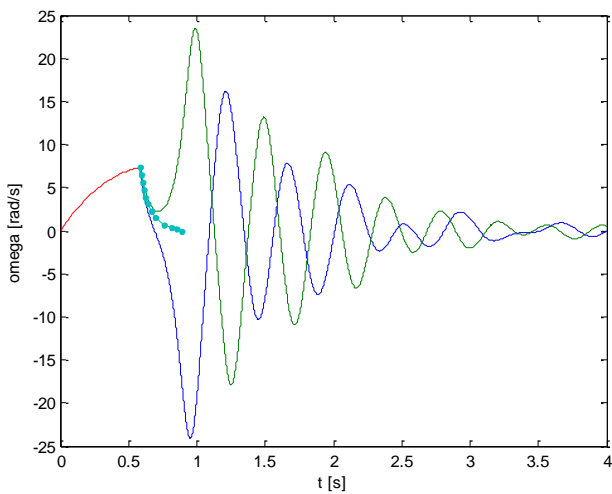
Nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,5833 sec, sedangkan nilai CCT yang diperoleh dari metode TDS adalah range antara (0,58 – 0,59) sec.



Gambar 4.113. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* dengan mempertimbangkan *damping coefficient* bila mengalami gangguan di titik M



Gambar 4.114. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di M



Gambar 4.115. Grafik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 5 generator terhubung *infinite bus* dengan *damping* bila gangguan di M

Pada grafik yang disajikan pada Gambar 4.103 – Gambar 4.114 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil maka sesuai *stable trajectory*, sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil maka sesuai *unsable trajectory*, sistem akan berosilasi ke keadaan tidak stabil setelah mengalami gangguan. Grafik yang ditampilkan diatas hanya pada empat titik gangguan yaitu C,D,E, dan M, untuk dapat mengamati nilai CCT yang benar-benar berada diantara titik stabil dan tidak stabil sistem setelah mengalami gangguan. Sementara grafik untuk titik gangguan yang lain (A,B,F,G,H,I,J,K, dan L) tidak ditampilkan karena hasil simulasi menunjukkan grafik sistem yang tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi pada titik-titik tersebut, sehingga tidak terlalu dapat diamati dimana letak nilai CCT (yang seharusnya diantara titik stabil dan titik tidak stabil) setelah gangguan terjadi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi dan analisis dari perhitungan CCT menggunakan metode CUEP saat mengabaikan dan mempertimbangkan *damping coefficient* serta saat tidak dan sedang terhubung *infinite bus* dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode perhitungan CCT yang dilakukan pada sistem 3 generator 9 bus, 2 generator 9 bus terhubung *infinite bus*, 6 generator 30 bus, dan 5 generator 30 bus terhubung *infinite bus* saat mengabaikan dan memperhitungkan *damping coefficient* mampu memberikan nilai yang akurat mengenai kestabilan transien dengan nilai *error* keseluruhan yang kurang dari 1%.
2. Metode perhitungan CCT dengan metode *critical trajectory* dapat langsung menentukan nilai CCT di setiap titik gangguannya, tidak seperti pada metode konvensional *time domain simulation / numerical simulation method* yang hanya menentukan *range* dari CCT stabil dan tidak stabil
3. Metode perhitungan CCT *critical trajectory* memerlukan waktu simulasi yang lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional TDS
4. Metode *critical trajectory* terbukti dapat diterapkan di sistem yang bervariasi dan kompleks dan dapat memberikan nilai CCT yang cepat dan akurat
5. Nilai X_d' generator juga dapat digunakan untuk mengecek validasi dari perhitungan nilai CCT yang didapatkan. Dan hasil yang lebih akurat didapatkan saat X_d' dimodelkan dengan ditambahkan kontroler berupa AVR dan *governor*.

5.2 Saran

Adapun terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk dilakukan perbaikan dan pengembangan simulasi dengan metode ini sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pengembangan program *critical trajectory* dengan batasan CUEP, yaitu dengan cara menghubungkan program BCU-*shadowing* dengan program *critical trajectory*, sehingga pengguna tidak

perlu menjalankan program dua kali dan memasukkan data lagi, tetapi hanya perlu menjalankan program analisa kestabilan transien dengan sekali step saja dan langsung didapatkan nilai CCT pada gangguan yang ingin diamati.

2. Perlu dilakukan simulasi pada sistem standart IEEE dan standart yang digunakan internasional lebih banyak lagi untuk membuktikan keakuratan metode dalam memberikan penilaian terhadap kestabilan transien pada sistem multimesin yang lebih lanjut.

3. Perlu dilakukan pengujian perhitungan CCT pada berbagai macam sistem tenaga listrik di industri, selain pada sistem standart IEEE dan Fouad Anderson, untuk membantu memecahkan masalah kestabilan transien di ranah perindustrian Indonesia.

4. Perlu dilakukan pengkajian nilai X_d' generator yang ketika mempertimbangkan kontroler berupa AVR dan *governor* lebih lanjut, untuk dapat memodelkan generator dan mesin secara lebih kompleks yang mendekati keadaan di dunia nyata, sehingga ketika dilakukan implementasi pada sistem memiliki nilai *error* yang lebih kecil lagi.

LAMPIRAN

I. Data generator sistem Anderson dan Fouad 9 bus

Tabel L.1 Data generator sistem Anderson dan Fouad 9 Bus

ID	Bus	MVA	MW	Rated kV	%PF	Speed (rpm)
G ₁	1	247.5	200	16.5	80	180
G ₂	2	192	163	18	85	3600
G ₃	3	128	85	13.8	85	3600

II. Data generator sistem IEEE 30 bus

Tabel L.2 Data generator sistem IEEE 30 Bus

ID	Bus	MVA	MW	Pg min	Pg max	Qg min	Pg max	%PF
G ₁	1	82.4	50	20	80	-50	50	97
G ₂	2	82.6	50	20	80	-50	50	97
G ₃	5	158.8	105	50	150	-50	50	94
G ₄	8	88.3	50	25	85	-40	40	96
G ₅	11	22.6	20	10	20	-30	30	88
G ₆	13	25.4	20	12	24	-30	30	94

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*” *IEEE Transactions on Power system* , vol. 19, no. 2, may 2004.
- [2] Das, J.C., “*Transient in Electrical System, Analysis ,Recognition, and Mitigation*“ , McGraw-Hill, Inc, 2010.
- [3] Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [4] Hafidz, Isa, ”Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di *Project Pakistan Deep Water Container Port*”. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2014.
- [5] Athay T., R. Podmore, S. Virmani, “*A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability,*” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.2, March/April 1979
- [6] Grainger, J.J., Stevenson, W.D., *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, Inc, 1994
- [7] Satria, Aldhimas, ”Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di *Project Pakistan Deep Water Container Port*”. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2014.
- [8] N. Yorino, A. Priyadi, Hironori K., dan M. Takeshita, “*A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability,*” IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [9] N. Yorino, A. Priyadi, Y. Zoka, “*A Method for Direct Computation of Critical Clearing Time for Transient Stability Analysis,*” 2010 IREP Symposium- Bulk Power

System Dynamics and Control – VIII (IREP), August 1-6, 2010, Buzios, RJ, Brazil

- [10] J. Chapman, Stephen, *Electric Machinery Fundamentals Fourth Edition*, New York: McGraw-Hill, Inc, 2005.
- [11] K. Ariyo, Funso, *Electrical Network Reduction for Load Flow and Short-Circuit Calculations using PowerFactory Software*, Electrical and Electronic Engineering, Vol. 3 No. 1, 2013, pp. 1-7. doi: 10.5923/j.eee.20130301.01.
- [12] Canizares, C.A., *Voltage Stability Assessment*, Concepts, Practices and Tools.IEEE/PES Power System Stability Subcommittee, Final Document, Tech. Rep., August, 2002
- [13] Ajjarapu, V., Christy, C., “*The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis*,” IEEE Transactions on Power Systems 7(1), 416–423 (1992)
- [14] Canizares, C.A., “*Applications of Optimization to Voltage Collapse Analysis*,” Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, San Diego, USA, July 1998
- [15] Granville, S., Mello, J.C.O., Melo, A.C.G., “*Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability*,” IEEE Transactions on Power Systems 11(4), 1096–1103 (1996)
- [16] Irisarri, G.D., Wang, X., Tong, J., Mokhtari, S., “*Maximum Loadability of Power Systems using Interior Point Nonlinear Optimization Method*,” IEEE Transactions on Power Systems 12(1), 162–172 (1997)
- [17] Overbye, T.J., “*A Power Flow Measure for Unsolvable Cases*,” IEEE Transactions on Power Systems 9(3), 1359–1365 (1994)
- [18] Overbye, T.J., “*Computation of a Practical Method to Restore Power Flow Solvability*,” IEEE Transactions on Power Systems 10(1), 280–287 (1995)
- [19] Milano, F., *Power System Modeling and Scripting*, New York: Springer-Verlag London, 2010

- [20] Chiang, Hsiao-Dong, *Direct Methods for Stability Analysis of Electric Power Systems*, Canada: John Wiles & Sons, Inc, 2011

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Muhammad Feisal Hakim, dilahirkan di kota Kediri, Jawa Timur pada 15 April 1993. Penulis adalah putra dari pasangan Joedi Prajitno dan Dwi Sunaryati. Memulai jenjang pendidikan di TK Mojoagung, kemudian melanjutkan pendidikan formal di SDN Mojoroto VI Kediri, SMPN 1 Kota Kediri, dan SMAN 2 Kota Kediri hingga lulus pada tahun 2011. Pada tahun itu juga, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selain aktif di kepanitiaan lomba dan event di Teknik Elektro dan di Divisi Workshop Teknik Elektro 2012/2013, penulis juga aktif sebagai asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email feisalhakim@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan